

PROJECTO GEOMÉTRICO DE UMA ROTUNDA ELÍPTICA

VANDA BRANDÃO BASTOS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: Professor Doutor Adalberto Quelhas da Silva França

JANEIRO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À minha Avó

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Adalberto Quelhas da Silva França pela disponibilidade e conhecimento transmitido.

Aos meus pais pela dedicação e carinho que sempre tiveram ao longo dos anos, pela paciência, força e optimismo nos momentos em que tudo parecia correr pelo pior. Principalmente por sempre acreditarem nas minhas capacidades e nunca desistirem de me apoiar nas minhas decisões.

À minha irmã, Sara, por em qualquer ocasião conseguir fazer-me sorrir, por acreditar nas minhas capacidades e fazer questão em o dizer vezes sem conta, pela partilha de emoções, pelos conselhos dados, pela paciência nos maus momentos e principalmente por ser única.

Ao meu namorado, Nelson Silva, por me ter apoiado incondicionalmente ao longo deste processo, pelos conhecimentos de informática, que sem eles esta tese teria demorado o dobro do tempo que demorou, pela tradução, pelas opiniões durante a parte escrita.

RESUMO

Este trabalho apresenta o Projecto de Execução de uma intersecção giratória. Após o Estudo Prévio, a forma elíptica foi considerada a mais apropriada. Mas como é frequente nestes casos, a elipse é substituída por uma “quase-elipse”, melhorando as suas características geométrico-rodoviárias.

Atendendo às características de funcionamento da rotunda, os ramos afluentes sofreram deflexões da trajectória inicial, de forma a provocar aos condutores a sua prévia percepção e consequente redução de velocidade.

A inserção da rotunda no local proposto implicou alterações nas infra-estruturas rodoviárias existentes. É objectivo deste projecto minimizar as intervenções na área envolvente para otimizar os custos de obra e evitando, dentro do possível, novas expropriações que obrigam a tempos de espera longos e prejudiciais.

Estas intervenções incidem maioritariamente sobre a planta e perfis longitudinais dos ramos afluentes que terão de ser adaptados ao perfil da rotunda mantendo a continuidade.

Foram tidas em conta as condicionantes das instruções das E.P.- Estradas de Portugal S.A., nomeadamente as relativas a inclinações máximas na rotunda. Outra condicionante do projecto é o caso particular do ramo A que se pretende que permaneça inalterado.

Neste documento são apresentadas as peças desenhadas, planta e perfil longitudinal, relativas às modificações necessárias a efectuar nos ramos e no local de implantação da rotunda. As peças desenhadas foram obtidas com a ajuda do programa de desenho assistido por computador AutoCAD e folha de cálculo Excel.

PALAVRAS-CHAVE: rotunda elíptica, projecto de execução, implantação da rotunda, peças desenhadas, condicionantes.

ABSTRACT

This work presents the Detailed Design of a circular intersection. Once concluded the Requirements Analysis the elliptic shape was found to be more appropriate. However, as usual in these cases, the ellipse is replaced by a “quasi-ellipse”, thus improving its geometrical characteristics.

Attending to the roundabout’s principle of operation, the connecting branches suffered deflection from their initial trajectory, providing the drivers an early perception leading to consequent speed reduction.

The insertion of the roundabout at the proposed location implied changes in the existent infra structures. It is a goal of this project to minimize interventions in the surrounding area in order to optimize costs avoiding, within possible, new expropriation which would imply further harmful delays.

In its majority, these interventions relate to the plant and longitudinal profile of affluent branches that must adapt to the roundabout’s profile in order to maintain continuity.

The regulations of “E.P. – Estradas de Portugal S.A.” were accounted for, namely the ones relating to maximum slope within the roundabout. Another project requirement is the special case of branch which is required to remain unchanged.

This paper presents the parts design, plant and longitudinal profile, relative to the modifications required on the branches and the roundabout’s implantation location. The designed parts were conceived using the computer assisted design application AutoCAD as well as Excel spreadsheets.

KEYWORDS: elliptical roundabout, detailed design, roundabout’s implantation, designed parts, requirement.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1. INTRODUÇÃO	 1
2. GEOMETRIA DO TRAÇADO – CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS	3
2.1. CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO	3
2.2. PRINCÍPIOS DE DIMENSIONAMENTO	4
2.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	4
2.2.2. DISPOSIÇÃO DOS RAMOS AFLUENTES E ILHA CENTRAL	4
2.2.3. DIMENSIONAMENTO DAS ENTRADAS	4
2.2.4. DIMENSIONAMENTO DAS SAÍDAS	5
2.2.5. ANEL DE CIRCULAÇÃO	5
2.2.6. ILHÉU SEPARADOR E DEFINIÇÃO DE BERMAS	5
2.2.7. INCLINAÇÕES LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS	5
3. GEOMETRIA DO TRAÇADO – ESTUDO PRÉVIO	7
3.1. ESTUDO DO TRAÇADO	7
4. GEOMETRIA DO TRAÇADO	11
4.1. DEFINIÇÃO DA ELIPSE	11
4.2. IMPLANTAÇÃO DA ROTUNDA	16
4.3. GEOMETRIZAÇÃO DA ENTRADA DOS RAMOS NA ROTUNDA	22
4.3.1. DESENVOLVIMENTO DA ROTUNDA	22
4.3.2. ENTRADA DOS RAMOS NA ROTUNDA	23
4.3.3. CONSTRUÇÃO DOS ILHÉUS SEPARADORES E BERMAS	31
4.4. TRAÇADO EM PERFIL LONGITUDINAL	36
4.4.1. ROTUNDA	36
4.4.2. RAMO A	43
4.4.3. RAMO B	44
4.4.4. RAMO C	49
4.4.5. RAMO D	52
4.4.6. RAMO E	56

5. CONCLUSÃO	61
Bibliografia	63
6. ANEXOS	67
6.1. DEFINIÇÃO DA ELIPSE	67
6.2. PERFIL LONGITUDINAL	68
6.2.1. PERFIL LONGITUDINAL DA ROTUNDA	68
6.2.2. PERFIL LONGITUDINAL DO RAMO B	72
6.2.3. PERFIL LONGITUDINAL DO RAMO C	73
6.2.4. PERFIL LONGITUDINAL DO RAMO D	74
6.2.5. PERFIL LONGITUDINAL DO RAMO E	74
6.3. PEÇAS DESENHADAS	77

Índice de Figuras

Fig. 1 - Representação dos Ramos a serem intersectados.....	7
Fig. 2- Comparação das soluções circular e elíptica	8
Fig. 3- Elementos da elipse.....	9
Fig. 4 - Definição dos semi-eixos da elipse.....	9
Fig. 5 - Divisão da elipse em quadrantes.....	10
Fig. 6 - Composição da “quase elipse”.	11
Fig. 7 - Construção da clotóide (curva ovóide).	14
Fig. 8 - Resultado final da construção da rotunda elíptica.....	15
Fig. 9 - Planta de implantação da rotunda.	16
Fig. 10 - Definição dos pontos A_1 , A_2 , B_1 , e B_2 da clotóide.	19
Fig. 11 – Comprimentos parciais da rotunda.	22
Fig. 12 - Pontos notáveis do bordo exterior da rotunda.	23
Fig. 13 - Construção de uma perpendicular a uma clotóide.	24
Fig. 14 - Representação do anel de circulação.....	25
Fig. 15 - Deflexão de Ramo B.....	26
Fig. 16 - Deflexão do Ramo C.....	27
Fig. 17 - Deflexão do Ramo D.....	27
Fig. 18 - Deflexão do Ramo E.....	27
Fig. 19 – Construção das vias de entrada e saída do Ramo A.	29
Fig. 20 - Construção das vias de entrada e saída do Ramo B.	30
Fig. 21 - Construção da via de saída da rotunda do Ramo C.....	30
Fig. 22 - Construção das vias de entrada e saída do Ramo D.	31
Fig. 23 - Construção da via de entrada na rotunda do Ramo E.	31
Fig. 24 - Representação das bermas da rotunda.....	32
Fig. 25 - Construção das bermas e do ilhéu separador do Ramo A.....	32
Fig. 26 - Condicionantes das bermas do ramo B.....	33
Fig. 27 - Construção das bermas e do ilhéu separador do Ramo B.....	33
Fig. 28 - Construção das bermas do Ramo C.....	34
Fig. 29 - Construção das bermas e do ilhéu separador do Ramo D.....	35
Fig. 30 - Construção das bermas do Ramo E.....	35
Fig. 31 - Representação do perfil longitudinal do terreno.	36

Fig. 32 - Rasante do terreno.....	37
Fig. 33 - Elementos de uma concordância vertical convexa.	38
Fig. 34 - Perfil longitudinal da rotunda, com as respectivas sobreelevações.	42
Fig. 35 - Perfil longitudinal do ramo A.	43
Fig. 36 - Perfil longitudinal do terreno pré-existente do ramo B.	44
Fig. 37 - Perfil longitudinal do ramo B.	47
Fig. 38 - Sobreelevação ao longo do ramo B.	49
Fig. 39 - Perfil longitudinal do terreno pré existente do ramo C.	49
Fig. 40 - Perfil longitudinal do ramo C.	51
Fig. 41 - Sobreelevações ao longo do ramo C.	52
Fig. 42 - Perfil longitudinal do terreno do ramo D.	52
Fig. 43 - Perfil longitudinal do ramo D.	54
Fig. 44 - Sobreelevações ao longo do ramo D.	56
Fig. 45 - Perfil longitudinal do terreno pré-existente do ramo E.	56
Fig. 46 - Perfil longitudinal do ramo E.	58
Fig. 47 - Sobreelevações ao longo do ramo E.	59

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros da clotóide das curvas circulares.	13
Tabela 2 - Parâmetros que permitem definir a distância entre os centros das circunferências.	14
Tabela 3 - Coordenadas dos pontos C0 e C'.	16
Tabela 4 - Coordenadas dos pontos A' e CG.	17
Tabela 5 - Coordenadas do centro da curva circular menor, CP.	18
Tabela 6 - Coordenadas do vértice B'.	19
Tabela 7 - Coordenadas do ponto A1.	20
Tabela 8 - Coordenadas do ponto A2.	21
Tabela 9 - Quilometragem dos pontos notáveis da rotunda.	23
Tabela 10 – Parâmetros para tornar perpendicular os ramos B e E.	24
Tabela 11 - Quilometragem dos Ramos.	28
Tabela 12 - Cotas do terreno dos pontos de inserção dos ramos, na rotunda.	36
Tabela 13 – Cota e distância à origem do vértice V1, da primeira concordância.	39
Tabela 14 - Distâncias à origem dos pontos de tangência T1 e T2.	40
Tabela 15 - Distância à origem e cota do ponto mais alto da concordância.	40
Tabela 16 - Cota e distância à origem do vértice V2, da segunda concordância.	40
Tabela 17 - Distâncias à origem e cotas dos pontos de tangência T3 e T4.	41
Tabela 18 - Distância à origem e cota do ponto mais baixo da segunda concordância.	41
Tabela 19 – Tabela resumo das características da rasante, dos pontos notáveis.	41
Tabela 20 - Distância à origem e cota do ponto V1.	45
Tabela 21 - Distâncias à origem e cotas dos pontos de tangência T1 e T2.	45
Tabela 22 – Distância à origem e cota do vértice V2.	46
Tabela 23 - Distâncias à origem e cotas dos pontos de tangência T3 e T4.	47
Tabela 24 – Cotas das bermas e eixo da via.	48
Tabela 25 -. Distâncias à origem e cotas dos pontos de tangência T1 e T2.	50
Tabela 26 - Distância à origem e cota do ponto V1.	51
Tabela 27 - Distância à origem e respectiva cota do vértice V1.	53
Tabela 28 - Distâncias à origem e cotas dos pontos de tangência.	54
Tabela 29 - Cotas das bermas e eixo da via.	55
Tabela 30 - Distâncias à origem e cotas dos pontos de tangência T1 e T2.	57
Tabela 31 - Distância à origem e cota do ponto V1.	58

Tabela 32 – Cotas das bermas da via.....	59
--	----

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a – metade do comprimento do eixo maior da elipse [m]

b – metade do comprimento do eixo menor da elipse [m]

R_G – raio da curva circular maior [m]

R_P – raio da curva circular menor [m]

A – parâmetro da clotóide [m]

R – raio mínimo de curvatura da clotóide [m]

L – desenvolvimento da clotóide [m]

τ – ângulo entre a tangente e o alinhamento recto/osculador [rad]

ΔR – ripagem [m]

$T_{(n)}$ – ponto de tangencia trainel/concordância

V – vértice da concordância

D – desenvolvimento da concordância [m]

t – distancia na horizontal, do ponto de tangencia trainel/concordância ao vértice [m]

i_1 – inclinação do trainel anterior [%]

i_2 – inclinação do trainel posterior [%]

JAE – Junta Autónoma de Estradas

1

INTRODUÇÃO

O presente documento descreve o Projecto de Execução de uma rotunda elíptica a ser localizada na freguesia de Arcozêlo, concelho de Vila Nova de Gaia, distrito do Porto.

A rotunda a projectar faz a ligação da Avenida João Paulo II, que é uma das artérias principais da freguesia, com a Auto-Estrada Porto-Aveiro (A29).

A necessidade da modificação do cruzamento projectado para uma intersecção giratória de nível surge devido à inserção de um novo ramo, aos volumes de tráfego crescentes e para reduzir os riscos de entradas na Auto-Estrada em sentido contrário.

Pretende-se também com a implantação de uma rotunda neste local a redução do número de pontos de conflito assim como o número e gravidade de acidentes.

O projecto deve implementar o mínimo de alterações às directrizes e rasantes existentes, com o propósito de minimização de custos de obra

2

GEOMETRIA DO TRAÇADO – CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

2.1. CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO

Uma rotunda ou intersecção giratória, é caracterizada por uma placa central intransponível, geralmente circular, para onde confluem diversos ramos, de sentido único ou duplo. Estes movimentos de entrada estão sujeitos à cedência de passagem relativamente à corrente prioritária que contorna a ilha central.

A utilização de intersecções giratórias em detrimento de outros tipos de cruzamento, deve-se ao facto de, com esta solução ser possível alcançar ganhos de segurança, que se traduz na redução do número e da gravidade dos acidentes. Isto acontece devido à organização dos fluxos de tráfego num sentido único de circulação, o que resulta da redução da velocidade de circulação devido à obrigatoriedade de cedência de prioridade, sendo desta forma suprimidos os movimentos de viragem à esquerda e atravessamentos aos quais estão associados os acidentes com maior gravidade e sinistralidade.

Devido à diminuição da velocidade de circulação quer na entrada, quer no atravessamento da intersecção e à redução dos pontos de conflito, obtém-se um aumento da capacidade das entradas e a aceitação de intervalos críticos de menor duração (diminuição do tempo de espera).

As rotundas adaptam-se bem a zonas urbanas e inter-urbanas, sendo mais indicadas nas zonas de transição, ou seja, na entrada em zonas urbanas ou zonas residenciais, uma vez que, nestes locais é necessário induzir aos condutores alterações do comportamento, nomeadamente redução da velocidade de circulação.

Para assegurar um bom funcionamento da rotunda é necessário assegurar que os fluxos de chegada sejam da mesma ordem de grandeza, uma vez que, neste tipo de intersecções nenhuma das entradas é favorecida. Em contrapartida, usufruem de uma grande vantagem nas intersecções em que os movimentos de inversão de marcha e viragens à esquerda têm uma importância significativa.

Comparativamente com as restantes intersecções, as rotundas são as únicas que se adaptam na perfeição na resolução de pontos de conflito em que o número de ramos afluentes ultrapassa os 4 e aquando da inserção de um novo ramo ou de um novo sentido, cujas alterações físicas são pouco significativas.

A implantação de rotundas em zonas planas ou em depressão não muito acentuada são as mais aconselhadas, visto que é assegurado o reconhecimento a longa distância da rotunda, permitindo assim aos condutores aperceberem-se da sua existência e consequentemente reduzirem a velocidade.

Para além das vantagens enumeradas, as rotundas também têm relevante importância em termos paisagísticos e ambientais. Os arranjos da ilha central permitem integrar-se facilmente na paisagem, e a prática de velocidades reduzidas e o consequente controlo de arranques e travagens, diminuem os índices de poluição ambiental e acústica.

As rotundas também apresentam limitações destacando-se, a ocupação duma grande área para implantação; a subordinação das correntes de tráfego prioritárias ao tráfego total; o não favorecimento de modos de transporte, sendo estes públicos ou prioritários.

2.2. PRINCÍPIOS DE DIMENSIONAMENTO

2.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para que a intersecção esteja correctamente dimensionada terá que estar de acordo com os diversos princípios de dimensionamento, a saber: o princípio de legibilidade, de segurança e amenidade de circulação e de maximização da capacidade.

O princípio de legibilidade traduz a necessidade de adoptar geometrias simples e padronizadas, que deverão ser atempadamente perceptíveis e de acordo com as expectativas naturais dos condutores. De acordo com este critério é recomendável que a solução geométrica a adoptar esteja ainda concorde com o princípio de dificultar as entradas e facilitar as saídas, isto é, garantir uma rápida saída dos veículos do interior da rotunda e penalizar os movimentos de entrada.

A utilização de rotundas como meio de acalmia de tráfego, através do condicionamento físico do comportamento do condutor, impondo a redução de velocidade quer na aproximação quer no atravessamento da rotunda, é uma das formas de aplicação do princípio de segurança e amenidade de circulação.

Como em zonas urbanas a velocidade de circulação é imposta devido à existência de picos horários, o critério de dimensionamento prevaiente é o da maximização da capacidade

2.2.2. DISPOSIÇÃO DOS RAMOS AFLUENTES E ILHA CENTRAL

A disposição dos ramos afluentes deve ser feita de forma regular em torno da ilha central, adoptando distâncias mínimas de 20 metros entre ramos consecutivos, de forma a impedir o traçado de trajectórias tangenciais.

A dimensão a adoptar da ilha central é dada em função directa do valor do diâmetro do círculo inscrito (DCI) e do número de vias de circulação no anel, sendo que, em condições normais de tráfego os raios deverão estar compreendidos entre os 2 e 30m. Preferencialmente em zonas urbanas recomenda-se a utilização de raios inferiores a 20m, a menos que exista uma presença significativa de veículos longos, onde se deverão utilizar raios superiores a 8m.

2.2.3. DIMENSIONAMENTO DAS ENTRADAS

As vias de entrada nas intersecções giratórias devem ter 4 metros de largura, sendo fortemente recomendada uma deflexão da trajectória, e consequente redução da velocidade. A esta deflexão da trajectória está associado o ângulo de entrada do veículo no anel de circulação, cujo valor deverá estar compreendido entre os 20 e os 60 graus sendo entre 30 a 40 graus os valores ideais.

O raio de entrada deverá assumir valores próximos dos 20,0m, de modo a impor a redução da velocidade. Nos casos em que o tráfego de pesados seja considerável é recomendável a utilização de raios superiores a 15m. Por sua vez, deve evitar-se a adopção de raios superiores a 50m.

2.2.4.DIMENSIONAMENTO DAS SAÍDAS

As saídas devem assegurar níveis de capacidade superiores aos das entradas de acordo com o princípio já enumerado de dificultar as entradas e facilitar as saídas. Sendo assim a largura das vias de saídas está directamente relacionada com os fluxos de tráfego envolventes.

Para soluções em que se opte por uma via de saída, a largura dessa via deverá ser superior a 4m sendo preferencialmente utilizado 5m.

Relativamente aos raios de saída, estes também deverão ser superiores aos raios de entrada, não sendo inferiores a 20m nem superiores a 100m sendo o valor aconselhado de 40m.

2.2.5.ANEL DE CIRCULAÇÃO

A largura do anel de circulação deverá estar compreendida entre os 5 e os 15m, sendo esta dimensão constante e capaz de garantir a continuidade do número de vias adoptada na entrada mais solicitada, sem contudo ultrapassar as 3 vias. A tipologia dos veículos que potencialmente venham a circular na rotunda influencia também a largura das vias de circulação do anel.

2.2.6.ILHÉU SEPARADOR E DEFINIÇÃO DE BERMAS

O ilhéu separador tem como função separar as correntes de entrada e saída e canalizar os movimentos de entrada. A sua projecção, em locais onde a velocidade prevista é inferior a 50Km/h, resulta do prolongamento da curva que intersecta tangencialmente o eixo da via afluenta e a delimitação da ilha central. Para o delimitar fisicamente é necessário recuar 0,5m em relação à guia horizontal e 1,0m em direcção do anel de circulação.

Para garantir a sua rápida percepção por parte dos condutores, qualquer lado do ilhéu separador deverá apresentar um comprimento superior a 2,5m e uma área fechada superior a 6m².

A largura das bermas deverá ser 1,0m, 0,5m em casos especiais, de forma a não incitar a pratica de estacionamento indevido. Em zonas que apresentam condicionalismos de espaço, e que a rotunda não tenha um papel muito importante aceita-se a supressão da berma.

2.2.7.INCLINAÇÕES LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS

A implantação de rotundas deverá ser preferencialmente em zonas planas, ou em trainéis com pouca inclinação, sendo as inclinações longitudinais normalmente adoptadas: 3% em zonas inter-urbanas e 5% em zonas urbanas, impondo 0,5% como mínimo devido a garantir as condições de drenagem superficial.

A inclinação transversal recomendada do anel é de $\pm 2,5\%$ independentemente do raio da ilha central, devendo assim garantir uma boa percepção da intersecção, drenagem de águas superficiais e o conforto de condução.

3

GEOMETRIA DO TRAÇADO – ESTUDO PRÉVIO

3.1. ESTUDO DO TRAÇADO

A necessidade de modificação do cruzamento existente (Fig. 1) deve-se à inserção de um novo ramo, o Ramo A.

Pretende-se que este ramo possua ligação com a Avenida João Paulo II (Ramos B e D) e com a entrada e saída da Auto-Estrada Porto-Aveiro (Ramos C e E respectivamente).

Uma das condicionantes mais fortes do projecto é a impossibilidade de alteração do perfil e da planta do Ramo A, obtendo-se assim pontos obrigatórios de passagem que condicionam a localização da intersecção a projectar bem como as suas cotas.

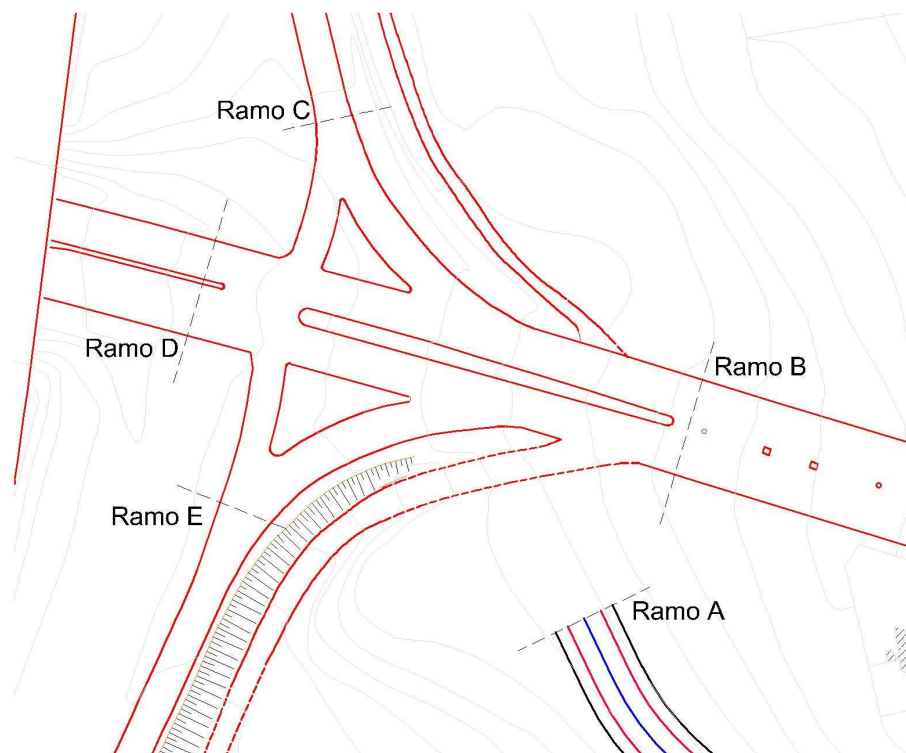


Fig. 1 - Representação dos Ramos a serem intersectados.

De modo a cumprir o condicionalismo descrito e reduzir as áreas de intervenção nas vias afluentes, a solução mais indicada é a projecção de uma rotunda.

Para além de se definir o tipo de intersecção é necessário definir a forma da rotunda, uma vez que podem existir rotundas circulares e elípticas.

Comparando as duas soluções (Fig. 2) verificou-se que a solução circular ocupava mais espaço em planta, o que é traduzido num aumento das expropriações necessárias e que as áreas de intervenção nas vias afluentes seriam maiores do que na solução elíptica.

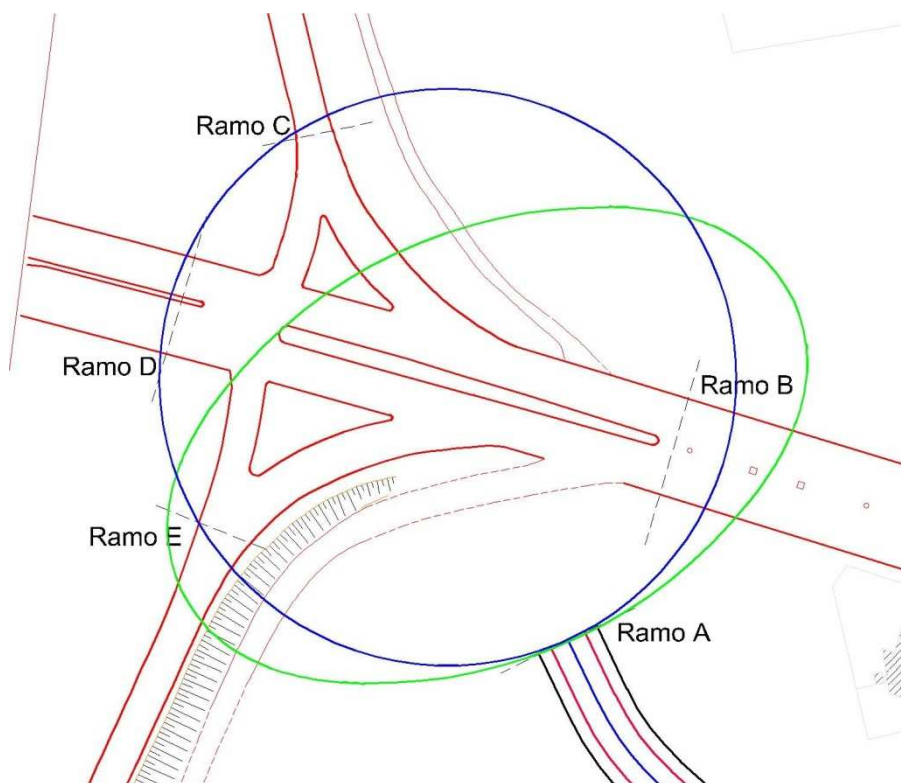


Fig. 2 – Comparação das soluções circular e elíptica.

Por estas razões a solução mais eficaz e aquela que tem em vista a redução do custo de obra é a solução elíptica.

Uma elipse é definida por um conjunto de pontos do plano cuja soma das distâncias a dois pontos fixos é constante e maior do que a distância entre eles.

Os pontos fixos são denominados por focos, e a distância entre estes é denominada distância focal. Os elementos constituintes da elipse são: o centro, os vértices, os focos, o eixo maior e o eixo menor conforme representados na Fig. 3.

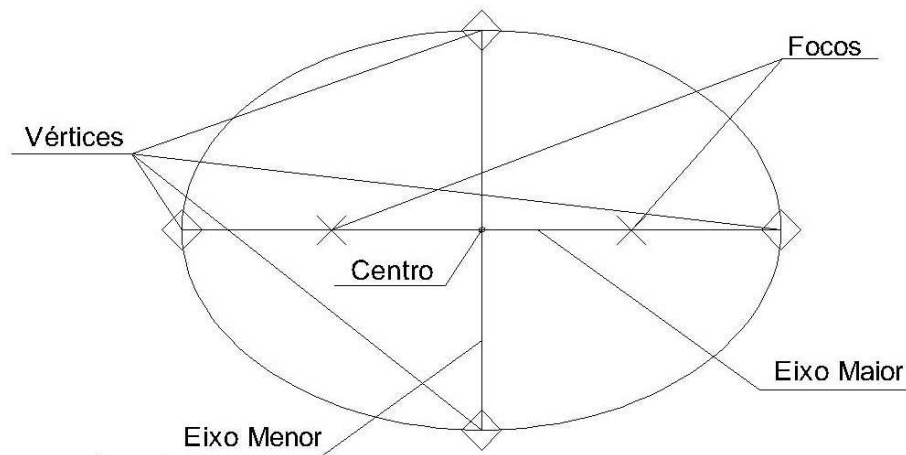


Fig. 3- Elementos da elipse

De acordo com as condicionantes do projecto, durante o Estudo Prévio, definiu-se 80m para o eixo mínimo e 120m para o eixo máximo.

Sendo definidos o eixo máximo e mínimo por 2a e 2b respectivamente, a equação reduzida da elipse é dada pela expressão (1).

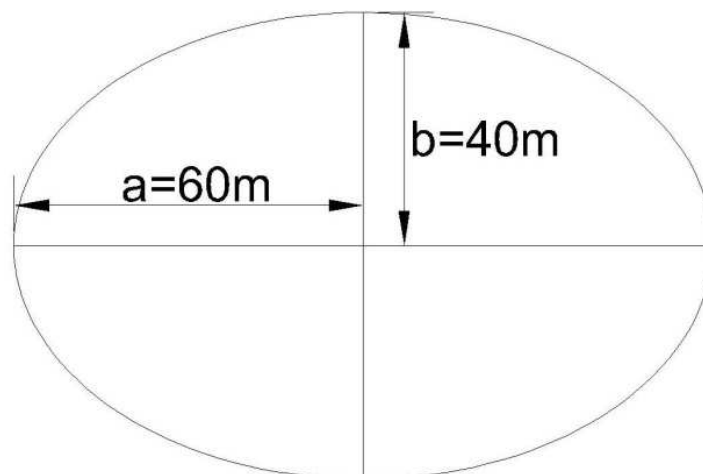


Fig. 4 - Definição dos semi-eixos da elipse.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

Como podemos verificar pela Fig. 4 o eixo maior e menor da elipse são eixos de simetria, dividindo a mesma em quatro quadrantes de modo a simplificar a sua construção.

Desta forma projectado um quadrante os restantes são obtidos por rebatimento do mesmo.

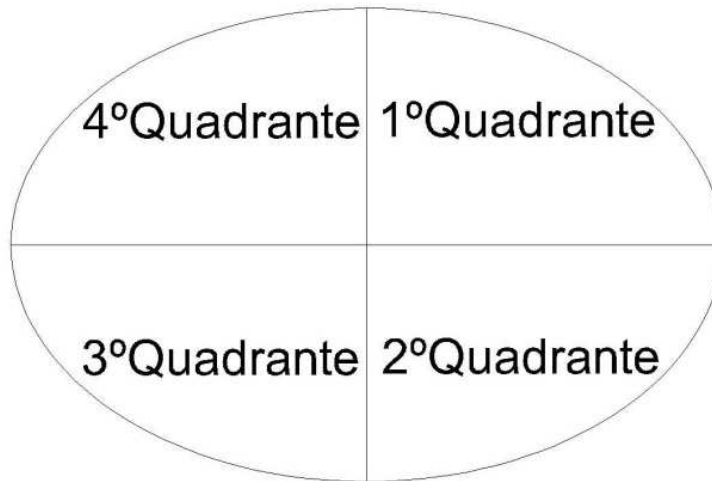


Fig. 5 - Divisão da elipse em quadrantes.

4

GEOMETRIA DO TRAÇADO

4.1.DEFINIÇÃO DA ELIPSE

Tal como é vulgar na construção deste tipo de rotundas, foi a elipse substituída por uma “quase elipse” constituída por dois pares de curvas circulares e arcos de clotóide ligando as circunferências.

A “quase elipse” é formada por dois pares curvas circulares, um com o raio máximo e o outro com o raio mínimo, sendo unidas por uma curva de transição (clotóide), como demonstra a figura 5.

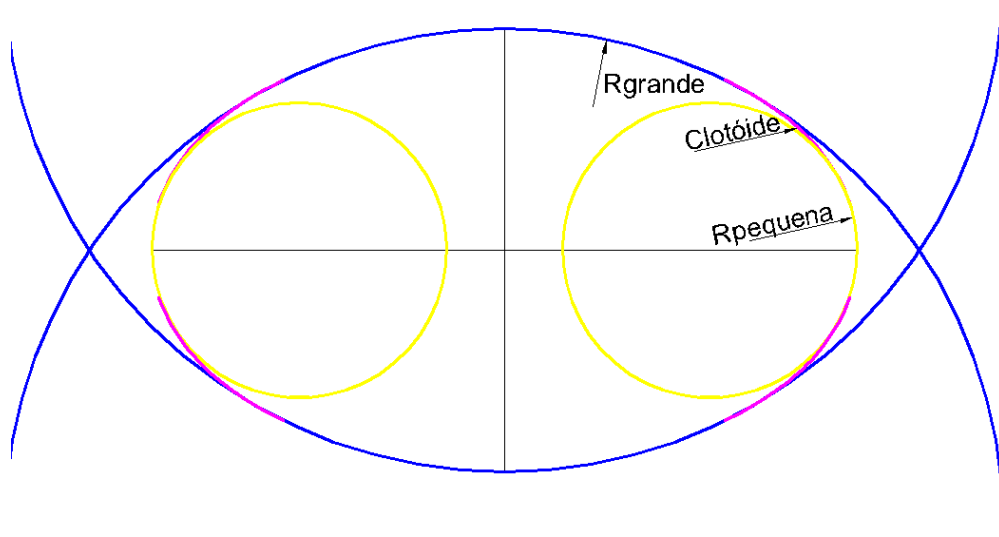


Fig. 6 - Composição da “quase elipse”.

Para forçar a semelhança com a elipse, os raios das curvas circulares são obtidos através das expressões (2) e (3).

$$R_G = \frac{a^2}{b} \quad (2)$$

$$R_p = \frac{b^2}{a} \quad (3)$$

Substituindo a e b por 60m e 40m respectivamente, obtém-se

$$R_G = \frac{60^2}{40} \Leftrightarrow R_G = 90m$$

$$R_p = \frac{40^2}{60} \Leftrightarrow R_p = 26,667m$$

Para definir o parâmetro da clotóide é necessário primeiramente estabelecer a velocidade base a que estão sujeitos os veículos no interior da rotunda. Sendo 30/40 Km/h a velocidade adoptada de acordo com as características da rotunda.

Pelas Normas do Traçado da ex-JAE, para velocidades base de 40 Km/h, o parâmetro mínimo da clotóide correspondente é de 35m.

A clotóide é caracterizada pelas expressões (4) e (5), em que A (m) é o seu parâmetro, R (m) o raio mínimo de curvatura, L (m) o desenvolvimento e τ (rad) o ângulo entre a tangente e o alinhamento recto/osculador.

$$A^2 = R * L \quad (4)$$

$$\tau = \frac{L}{2R} \quad (5)$$

As expressões (6) e (7) permitem obter as coordenadas da curva e consequentemente a sua piqueta-gem.

$$x = L - \frac{L^5}{40A^4} + \frac{L^9}{3456A^8} + \dots \quad (6)$$

$$y = \frac{L^3}{6A^2} - \frac{L^7}{336A^6} + \frac{L^{11}}{42240A^{10}} - \dots \quad (7)$$

Para calcular a ripagem (ΔR) e o encurtamento do alinhamento recto (X_m), utilizam-se as expressões que se seguem com τ expresso em graus.

$$\Delta R = R * (\cos \tau - 1) + y \quad (8)$$

$$X_m = x - R * \sin \tau \quad (9)$$

Tabela 1 - Parâmetros da clotoide das curvas circulares.

Parâmetros	CC _G	CC _P
A (m)	35	
R (m)	90	26,667
L (m)	13,611	45,937
τ (rad)	0,0756	0,861
τ (gr)	4,813	54,813
x (m)	13,603	42,646
y (m)	0,343	12,506
ΔR (m)	0,0859	3,217
X_m (m)	6,805	22,419

A distância entre os centros das circunferências, D, é obtida por

$$D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \quad (10)$$

em que

$$\Delta X = X_{mP} - X_{mG} \quad (11)$$

$$\Delta Y = (R + \Delta R)_G - (R + \Delta R)_P \quad (12)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta X}{\Delta Y}\right) \quad (13)$$

Após a construção de um quadrante, os restantes são obtidos por rebatimento. A figura 7 apresenta o resultado final dessa operação.

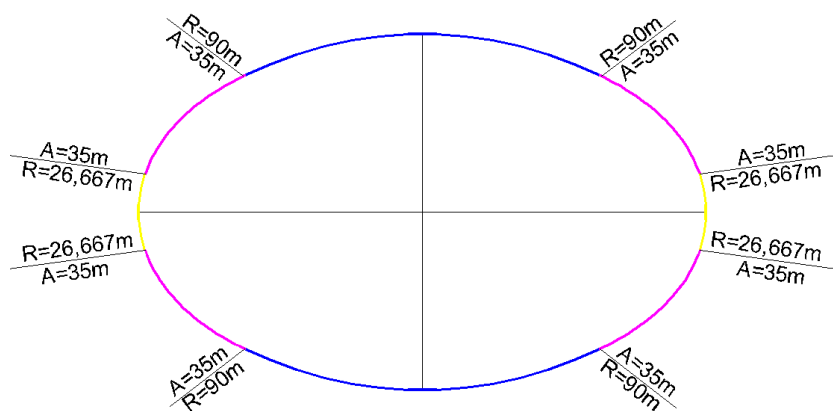


Fig. 8 - Resultado final da construção da rotunda elíptica.

4.2.IMPLANTAÇÃO DA ROTUNDA

Uma vez que o ponto inicial do Ramo A é um ponto obrigatório e a inserção das vias afluentes na rotunda têm que ser o mais perpendicular possível, optou-se por bloquear o ponto inicial da rotunda no Ramo A.

Fazendo assim com que neste ponto a rotunda estivesse na perpendicular com o eixo do Ramo A.

Definiu-se como C_0 o centro da rotunda e A' , B' , C' e D' os vértices. Nota-se que após a construção da rotunda os pontos B' e D' não distam do centro metade do eixo maior, sofrendo uma pequena alteração devido à construção com base em curvas circulares e clotóides e não rigorosamente uma elipse.

Em qualquer caso a variação da curvatura é rodoviariamente mais eficaz no caso de clotóide+circunferências do que na verdadeira elipse.

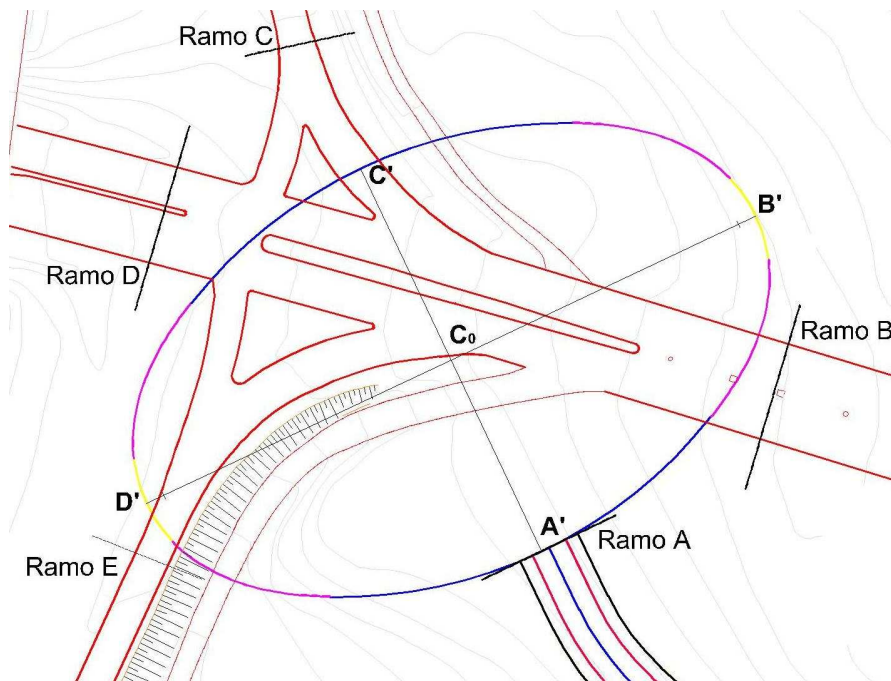


Fig. 9 - Planta de implantação da rotunda.

Através do programa AutoCAD recolheram-se as coordenadas dos pontos C_0 e C' (Tabela 3), os pontos A' e o centro da curva circular maior são obtidos através das coordenadas da Tabela 3, e do azimuth $Az(C_0C')$.

Tabela 3 - Coordenadas dos pontos C_0 e C' .

(m)	M	P
C_0	-42638,50	155078,33
C'	-42655,60	155114,49

$$\begin{cases} M_{A'} = M_{C'} + \overline{A'C'} * \text{sen}(Az(C_0C') + 200) \\ P_{A'} = P_{C'} + \overline{A'C'} * \cos(Az(C_0C') + 200) \end{cases}$$

$$\begin{cases} M_{C_G} = M_{C'} + \overline{C_G C'} * \text{sen}(Az(C_0C') + 200) \\ P_{C_G} = P_{C'} + \overline{C_G C'} * \cos(Az(C_0C') + 200) \end{cases}$$

$$\overrightarrow{Az(C_0C')} = \text{actg} \left(\frac{M_{C'} - M_{C_0}}{P_{C'} - P_{C_0}} \right) + 400 = 371,878 gr$$

Tabela 4 - Coordenadas dos pontos A' e C_G.

(m)	C'	M	P
A'	80	-42621,40	155042,17
C _G	90	-42617,12	155033,13

Sabendo que a equação geral de uma recta é dada por

$$y = mx + b \quad (14)$$

em que

$$m = \tan(100 - Az) \quad (15)$$

Logo,

$$m = \tan(100 - Az(C_0B')) \Leftrightarrow m = \tan(100 - (Az(C_0C') + 100))$$

$$m = 0,472907$$

Substituindo x e y pelas coordenadas do ponto C₀:

$$155078,33 = 0,472907 * (-42638,50) + b$$

$$b = 175242,375$$

A equação da recta com orientação $\overline{C_0B'}$ é dada por

$$y = 0,472907x + 175242,375 \quad (16)$$

Sendo a equação (17) a equação geral de uma circunferência genérica de raio r e centro x_0 e y_0 , a equação que traduz uma circunferência centrada em C_G ($x_0 = -42617,12$ e $y_0 = 155033,13$) e com raio D (10), distância entre os centros das circunferências, é dada pela equação (18).

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2 \quad (17)$$

$$(x - (-42617,12))^2 + (y - 155033,13)^2 = 62,192^2 \quad (18)$$

O cálculo das coordenadas do centro da curva circular de raio menor (C_P), é obtido pela intersecção da equação da circunferência de centro C_G e raio D (18), com a equação da recta que tem orientação $\overline{C_0B'}$ (16).

$$\begin{cases} y = 0,472907x + 175242,375 \\ (x - (-42617,12))^2 + (y - 155033,13)^2 = 62,192^2 \end{cases}$$

Tabela 5 - Coordenadas do centro da curva circular menor, C_P .

(m)	M	P
C_P	-42605,06	155094,14

Com as coordenadas do centro da curva pequena, calcula-se a partir destas as coordenadas do vértice B' , em que a distância $\overline{C_P B'}$ é de 26,667m.

$$\begin{cases} M_{B'} = M_{C_P} + \overline{C_P B'} * \sin(Az(C_0 C') + 100) \\ P_{B'} = P_{C_P} + \overline{C_P B'} * \cos(Az(C_0 C') + 100) \end{cases}$$

Tabela 6 - Coordenadas do vértice B'.

(m)	M	P
B'	-42580,95	155105,54

Designando A_1 e A_2 como os pontos que correspondem ao início e ao fim da clotóide, e por B_1 e B_2 os pontos que distam X_{m_G} e X_{m_P} do ponto de osculação.

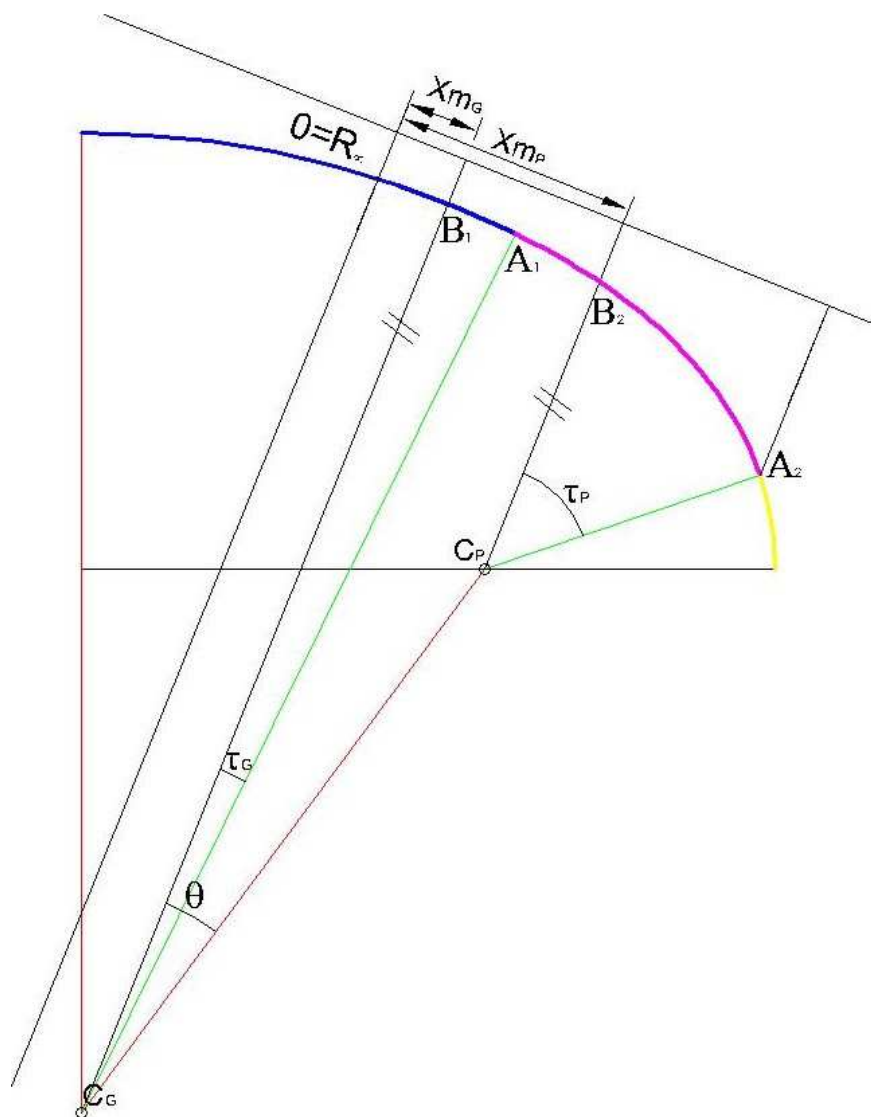


Fig. 10 - Definição dos pontos A_1 , A_2 , B_1 , e B_2 da clotóide.

Utilizando o mesmo método que se usou para calcular as coordenadas do centro da curva circular pequena:

$$Az(C_G A_1) = Az(C_G C_P) - \theta + \tau_G$$

$$Az(C_G C_P) = \arctg\left(\frac{M_{C_P} - M_{C_G}}{P_{C_P} - P_{C_G}}\right) \Leftrightarrow Az(C_G C_P) = \arctg\left(\frac{-42617,12 - (-42605,06)}{155033,13 - 155094,14}\right)$$

$$Az(C_G A_1) = 12,424 - 16,155 + 4,813 \Leftrightarrow Az(C_G A_1) = 1,08205 \text{ gr}$$

Uma vez que

$$m = \tan(100 - Az(C_G A_1)) \Leftrightarrow m = 58,8287$$

e substituindo x e y da equação geral da recta pelas coordenadas C_G , obtemos a equação que se segue.

$$y = 58,8287x + 2662142,215 \quad (19)$$

Intersectando a equação (19) com a equação (20), que representa a circunferência de raio 90m centrada em C_G , obtêm-se as coordenadas do ponto A_1 (Tabela 7).

$$(x - (-42617,12))^2 + (y - 155033,13)^2 = 90^2 \quad (20)$$

Tabela 7 - Coordenadas do ponto A_1 .

(m)	M	P
A_1	-42615,58	155123,11

Uma vez que as rectas que passam em B_1 e B_2 são paralelas, ou seja, ambas apresentam o mesmo azimute, então:

$$Az(C_P B_2) = Az(C_G B_1) = Az(C_G C_P) - \theta$$

$$Az(C_p B_2) = -3,731 gr$$

Empregando o método anterior, o azimuth da recta que une os pontos C_p e A_2 é dado por:

$$Az(C_p A_2) = Az(C_p B_2) + \tau_p$$

$$Az(C_p A_2) = 51,082 gr$$

Sendo m o declive da recta que passa por C_p e A_2 ,

$$m = \tan(100 - Az(C_p A_2)) \Leftrightarrow m = 0,96657$$

e b a ordenada na origem, em que,

$$b = P_{C_p} - m * M_{C_p} \Leftrightarrow b = 196275,035$$

logo, a equação da recta é dada por:

$$y = 0,96657x + 196275,035 \quad (21)$$

Intersectando a equação (21) com a equação da circunferência de centro C_p e raio 26,667m (22), obtêm-se as coordenadas do ponto final da clotóide, A_2 (tabela 8).

$$(x - (-42605,06))^2 + (y - 155094,14)^2 = 26,667^2 \quad (22)$$

Tabela 8 - Coordenadas do ponto A_2 .

(m)	M	P
A_2	-42585,89	155112,67

4.3.GEOMETRIZAÇÃO DA ENTRADA DOS RAMOS NA ROTUNDA

4.3.1.DESENVOLVIMENTO DA ROTUNDA

O desenvolvimento total da rotunda, correspondente ao seu bordo exterior é o quádruplo do comprimento do arco compreendido em qualquer dos quadrantes em que aquela pode ser dividida pelos seus dois eixos (suposta uma elipse). Cada um destes arcos (todos iguais) é constituído por uma clotóide e metade das circunferências de raio 90m e 26,667m.

O desenvolvimento da clotóide é dado por:

$$L_{CCP} - L_{CCG} = 45,937 - 13,611 = 32,326 m$$

Os comprimentos de arco das circunferências foram medidos em CAD, como se demonstra na figura 11.

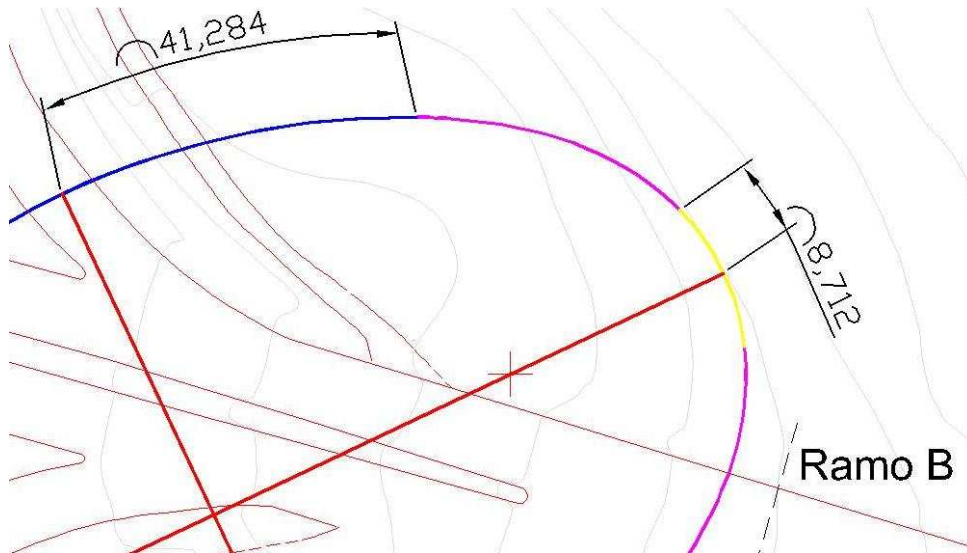


Fig. 11 – Comprimentos parciais da rotunda.

Logo, o desenvolvimento total da rotunda é dado por:

$$L_T = 4 * (41,284 + 32,326 + 8,712) = 329,288 m$$

Definiu-se como km 0+000, o ponto onde o eixo do Ramo A intersecta a rotunda, crescendo os quilómetros no sentido anti-horário. A tabela e a figura que se seguem apresentam os pontos notáveis da rotunda, em que se abrevia curva de transição para CT e a numeração das curvas circulares e das clotóides é feita de acordo com o sentido dos quilómetros crescentes.

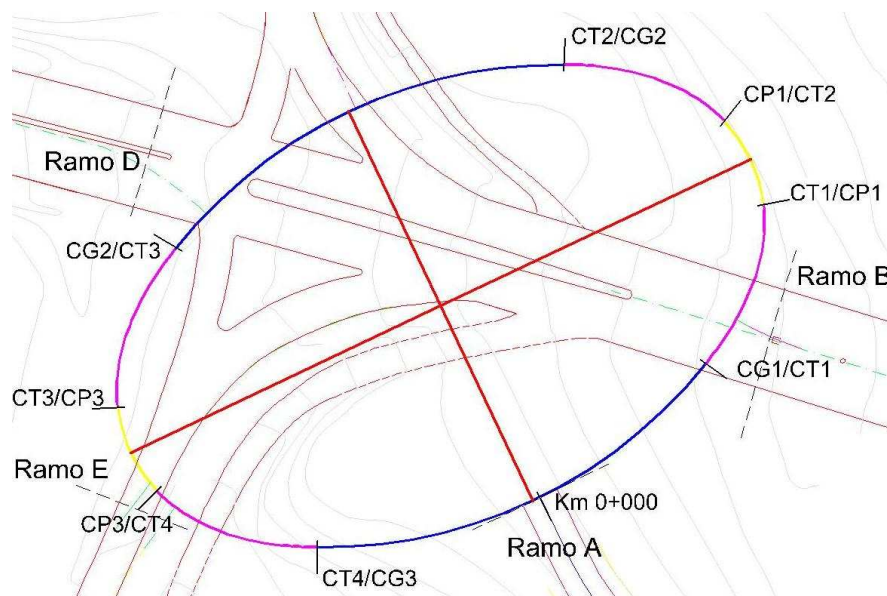


Fig. 12 - Pontos notáveis do bordo exterior da rotunda.

Tabela 9 - Quilometragem dos pontos notáveis da rotunda

Km	L	Pontos notáveis
0+000	0	Ramo A
0+041,284	41,284	CG1/CT1
0+073,610	32,326	CT1/CP1
0+091,034	2*8,712	CP1/CT2
0+123,360	32,326	CT2/CG2
0+205,928	2*41,284	CG2/CT3
0+238,254	32,326	CT3/CP3
0+255,678	2*8,712	CP3/CT4
0+288,004	32,326	CT4/CG3
0+329,288	41,284	Ramo A

4.3.2. ENTRADA DOS RAMOS NA ROTUNDA

A disposição da entrada dos eixos dos ramos na rotunda deve ser o mais aproximado de uma perpendicular e provocar uma deflexão da trajectória, do modo a impor aos condutores a redução da velocidade na aproximação à rotunda.

Na deflexão dos ramos, optou-se por fazer a finalização dos mesmos com raios de curvatura na ordem dos 50m. Uma vez que, a extensão dos ramos é pequena e o raio menor da rotunda é de 26,667m não seria possível fazer esta deflexão com uma curva em S.

A curva em S deveria ser constituída por duas curvas circulares de raios de proporção 1:2, o que implicava raios de 40m e 80m, o que não seria compatível com a extensão de estrada que temos disponível.

Os Ramos A, C e D inserem-se na rotunda em curva circular, o que significa que para tornar perpendicular estas entradas apenas é necessário unir o centro da curva circular em questão ao eixo dos respectivos ramos.

Os restantes ramos dão entrada na rotunda em clotóide. Para se determinar a perpendicular a uma clotóide é necessário fazer a construção da figura que se segue.

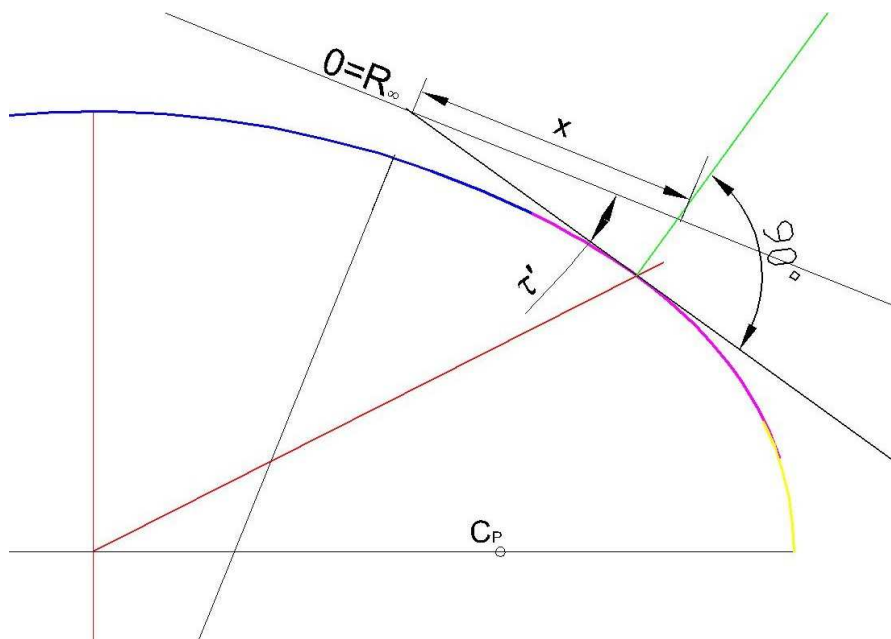


Fig. 13 - Construção de uma perpendicular a uma clotóide.

Para se proceder a esta construção é necessário saber a que raio pertence o eixo que intersecta a clotóide. Para tal é preciso medir a distância x , medida de que dista a intersecção do ponto de osculação. De acordo com a expressão (6) obtemos o desenvolvimento da clotóide até ao ponto pretendido.

O raio é obtido pela expressão (4), em função do parâmetro A da clotóide e do comprimento anteriormente calculado, o ângulo τ' resulta da expressão (5).

A tabela 10, apresenta os resultados para os Ramos B e E, uma vez que estes são os únicos que intersectam a rotunda em clotóide.

Tabela 10 – Parâmetros para tornar perpendicular os Ramos B e E.

	Ramo B	Ramo E
A	35	
x (m)	23,503	39,455
L (m)	23,625	41,446
R (m)	51,852	29,557

τ' (gr)	14,508	44,635
--------------	--------	--------

De seguida constrói-se o anel de circulação, que deve ser constante e capaz de garantir a continuidade do número de vias adoptadas na entrada mais solicitada, ou seja, os Ramos B e D. Estes devem apresentar o mesmo número de vias, ou seja, duas.

Adoptando então duas vias, susceptíveis de permitirem lado a lado um veículo articulado e um veículo ligeiro, a largura do anel de circulação é de 10m.

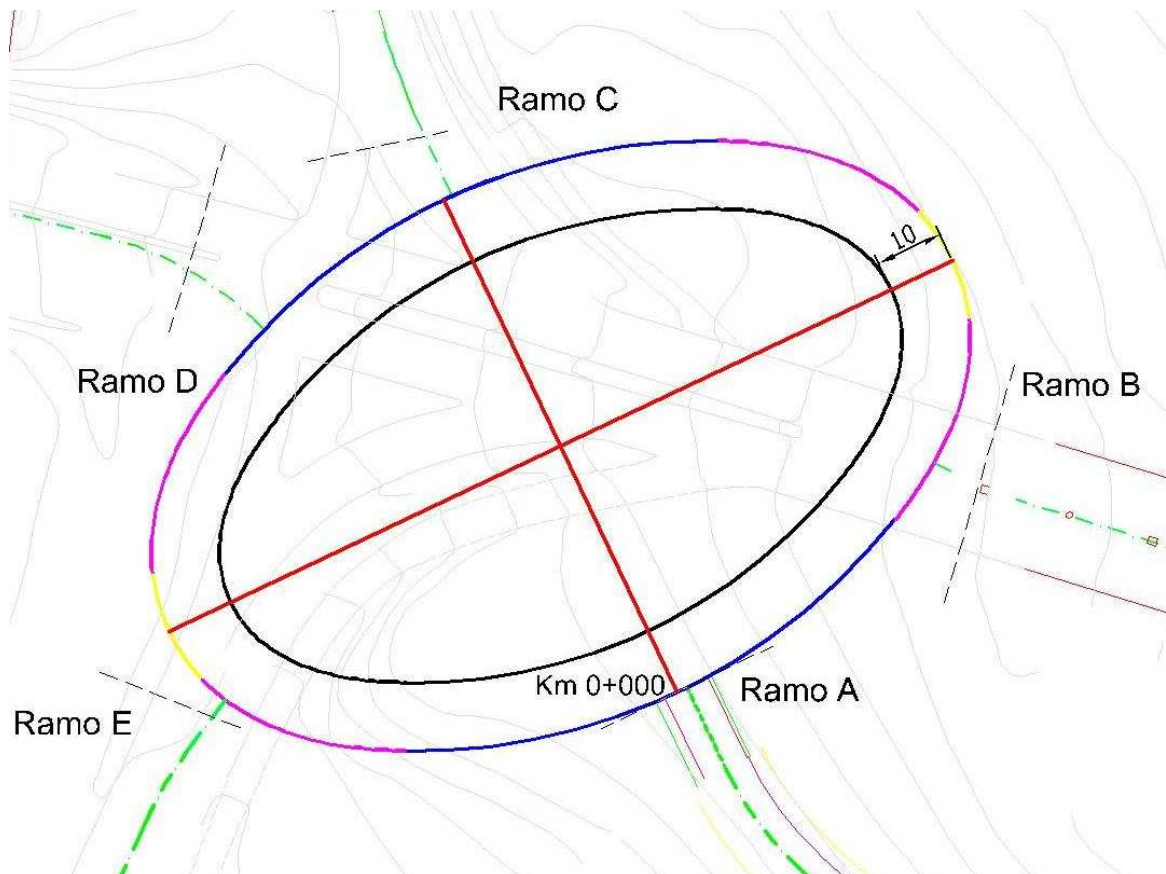


Fig. 14 - Representação do anel de circulação.

A deflexão dos ramos foi feita com a ajuda de uma curva circular de raio 50m, como demonstram as figuras 15 a 18. É de notar que o Ramo A se mantém inalterado, por esse motivo não é apresentada qualquer imagem do mesmo.

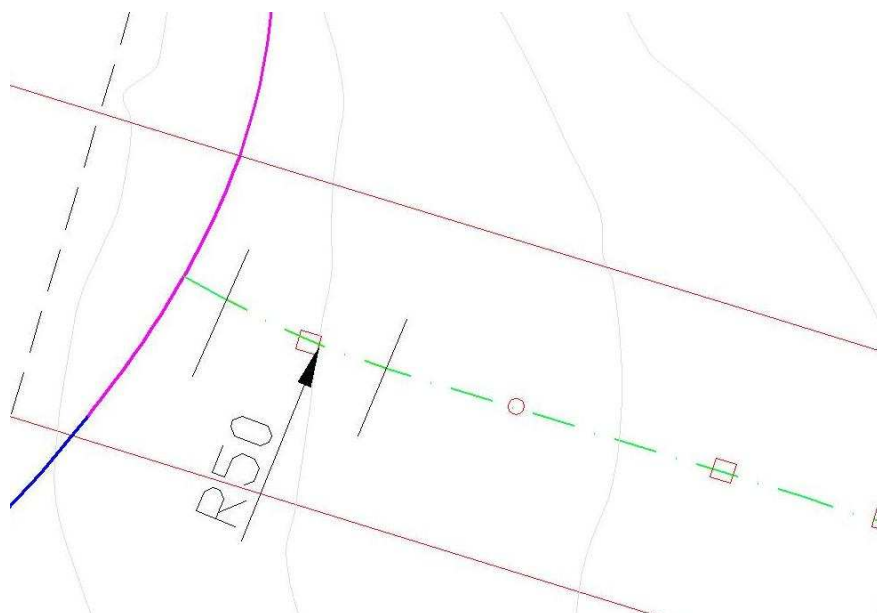


Fig. 15 - Deflexão de Ramo B.



Fig. 16 - Deflexão do Ramo C.



Fig. 17 - Deflexão do Ramo D.



Fig. 18 - Deflexão do Ramo E.

Na tabela 11 apresenta-se o resultado final das distâncias dos ramos à origem, obtidas a partir do cálculo das distâncias entre ramos como descrito nas equações seguintes.

$$L_{AB} = 39,706 + (23,625 - 13,611) = 49,598m$$

$$L_{AC} = 39,706 + 2 * 32,326 + 2 * 8,712 + 39,924 = 161,706 m$$

$$L_{AD} = 161,706 + 34,117 = 195,823 m$$

$$L_{AE} = 195,823 + 8,527 + 32,326 + 4 * 8,712 + (45,938 - 41,446) = 258,596 m$$

Tabela 11 - Quilometragem dos Ramos.

Km	Pontos
0+000	Ramo A
0+049,598	Ramo B
0+161,706	Ramo C
0+195,823	Ramo D
0+258,596	Ramo E

Após estarem definidos os eixos das vias, procede-se à construção gráfica em planta dos ramos. Os respectivos raios de entrada e saída da rotunda são definidos de acordo com as normas em vigor, assim como a respectiva deflexão a fazer nos diversos ramos.

Seguindo o sentido dos quilómetros crescente, começou-se pela construção gráfica em planta do Ramo A, adoptando 4m para a via de entrada e 5m para a via de saída da rotunda.

Isto permite que a largura das vias de entrada e saída estreitem de 4m ou 5m para 3,5m, visto que cada via da estrada afluyente apresenta inicialmente essa dimensão. É ainda necessário refazer uma pequena porção do ramo. Para isso optou-se por fazer essa passagem no menor espaço possível, com a ajuda de curvas circulares.

Para a via de entrada na rotunda definiu-se com 15m o raio de entrada, seguido de duas curvas circulares de raios 46m e 100m respectivamente.

Para a via exclusiva de saída da rotunda o raio escolhido como raio de saída é de 20m, sendo seguido por duas curvas circulares de sentido oposto sendo a primeira de 90m, do mesmo sentido que o raio de saída, seguido por uma curva de sentido oposto com raio de 53,5m.

Na figura 19 mostra-se como foi feita a construção das vias exclusivas de entrada e saída da rotunda para o Ramo A.

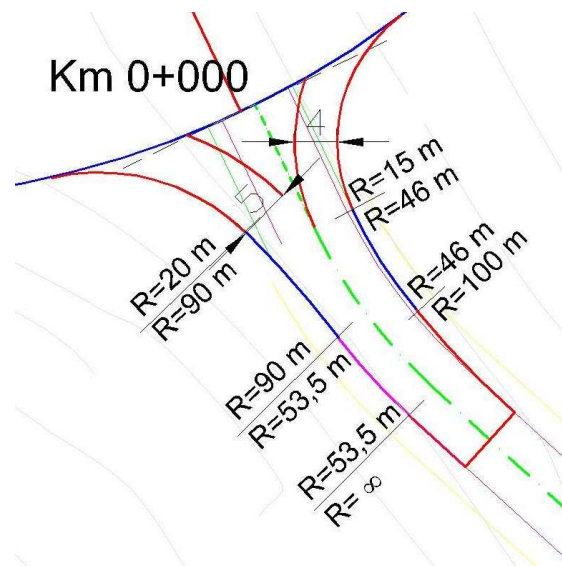


Fig. 19 – Construção das vias de entrada e saída do Ramo A.

Uma vez que, o Ramo B é constituído por 2x2 vias, seleccionou-se 4 metros para as vias de entrada e de saída. Esta diminuição da largura das vias de saída visa impedir mudanças de direcção tardias de modo a restringir o número de veículos que saem simultaneamente da rotunda ao número de vias disponível.

Como podemos verificar pela figura 20, preferiu-se medir a largura das vias a partir do bordo exterior para o interior, deixando algum espaço disponível junto ao eixo, para posteriormente serem colocados lancis galgáveis. Uma vez que se trata de uma zona residencial e devido às dimensões da rotunda, esta não será atravessada pelos peões, tendo de ser esta travessia feita nos ramos.

Para o raio de entrada na rotunda optou-se por 15m, de modo a induzir nos condutores a necessidade de diminuírem naturalmente a velocidade. Para o raio de saída da rotunda escolheu-se 35m facilitando assim a saída dos veículos.

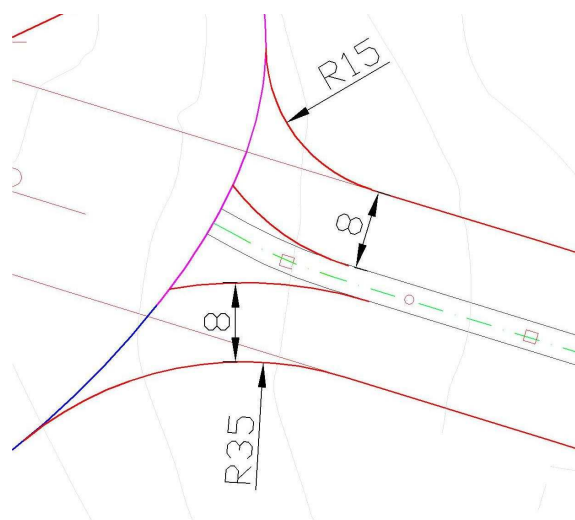


Fig. 20 - Construção das vias de entrada e saída do Ramo B.

Como o Ramo D é constituído por apenas uma via exclusiva de saída, decidiu-se que a largura da via seria constante e igual à largura existente de 6,40m, quanto ao raio de saída optou-se por 20m de acordo com as normas em vigor. A construção está exemplificada na figura 21.

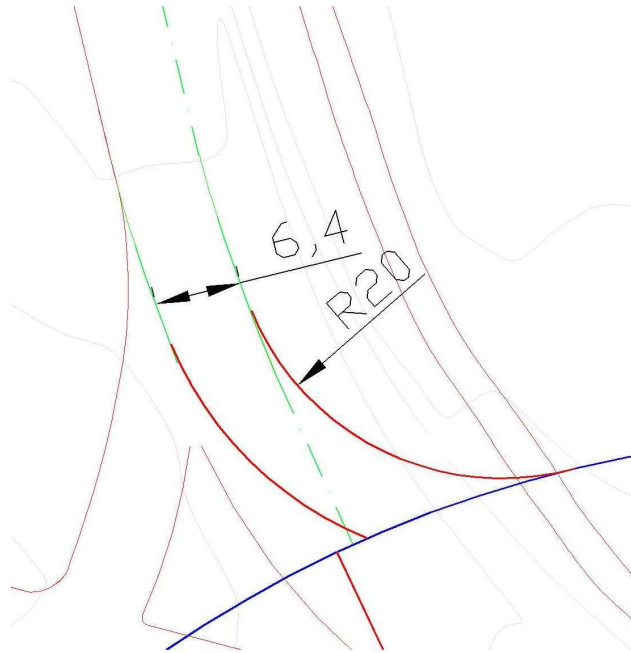


Fig. 21 - Construção da via de saída da rotunda do Ramo C.

À semelhança do Ramo B, o Ramo D apresenta 2x2 vias, logo utiliza-se a mesma dimensão para a largura das vias, 4m cada. Para o raio de entrada na rotunda, mantém-se os 15m, enquanto para o raio de saída aumentamos para 35m para facilitar as saídas da rotunda.

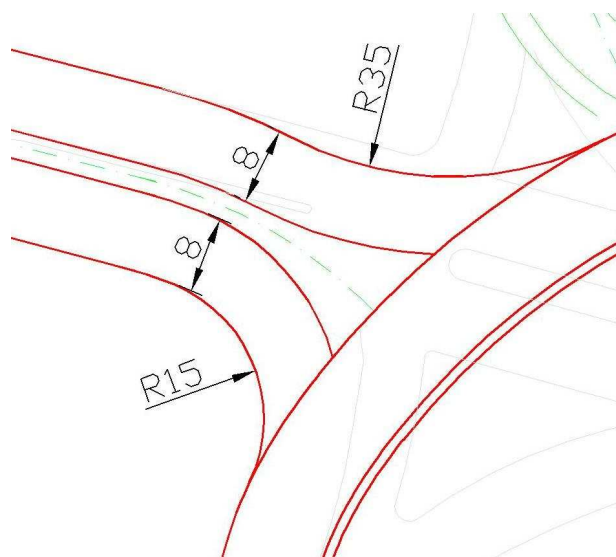


Fig. 22 - Construção das vias de entrada e saída do Ramo D.

O Ramo E é constituído por uma via exclusiva de entrada na rotunda, em que, se definiu 4m como largura. Uma vez que a via inicial tem 6,50m utilizou-se uma curva circular de 200m para tornar suave a diminuição da largura da via. O raio de entrada na rotunda é de 15m, o bordo da esquerda obtém-se fazendo um “offset” com 4m de distância do bordo da direita.

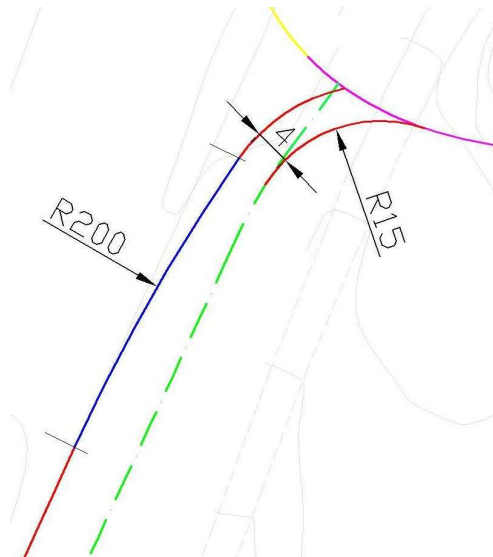


Fig. 23 - Construção da via de entrada na rotunda do Ramo E.

4.3.3.CONSTRUÇÃO DOS ILHÉUS SEPARADORES E BERMAS

De seguida traçaram-se as bermas da rotunda tendo para isso seleccionado 1m para a berma interior e 2,5m para a berma exterior. O traçado foi feito com “offsets” ao bordo interior e exterior da rotunda.

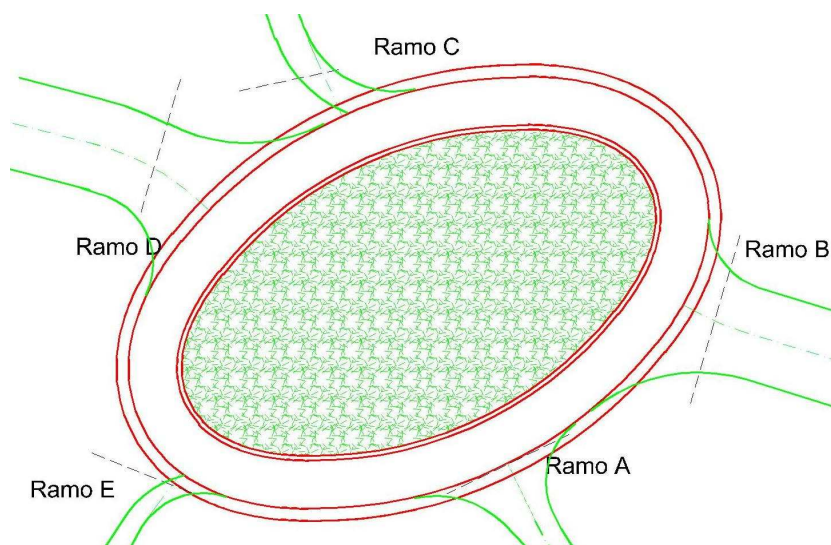


Fig. 24 - Representação das bermas da rotunda.

Para o Ramo A o traçado das bermas é realizado com paralelas aos bordos das vias.

As bermas exteriores têm 2,5m de largura e são tangentes à rotunda no ponto de intersecção.

O ilhéu separador resulta do prolongamento da curva que intersecta tangencialmente o eixo da via afluyente e a delimitação do bordo exterior da ilha central. A delimitação física é recuada em relação à guia de sinalização horizontal de 0,5m e 1,0m em relação à berma exterior do anel de circulação.

No ponto em que as paralelas intersectam a linha que limita a berma da rotunda foram colocadas duas concordâncias em arco com raio de 0,5m. O ponto final do ilhéu acontece quando existe largura suficiente para descrever uma circunferência de raio 0,5m entre as paralelas das guias de sinalização horizontal.



Fig. 25 - Construção das bermas e do ilhéu separador do Ramo A.

O Ramo B (Fig. 26), ao contrário dos restantes ramos, tem a dimensão das bermas como condicionante. Isto deve-se à existência de moradias próximas da intersecção, cujos passeios estão já definidos. Neste caso a melhor opção é manter a largura das bermas pré-existentes, diminuindo assim a largura da berma direita de 2,5m para 2,236m.

A concordância das bermas da rotunda com a do lado direito do Ramo B é construída com a ajuda de uma curva circular de raio 33,651m, em vez da habitual curva concêntrica à circunferência de saída.



Fig. 26 - Condicionantes das bermas do Ramo B.

Para a construção física do ilhéu separador, a distância aos bordos interiores das vias mantém-se, ou seja, 0,5m e 1m do da berma exterior da rotunda.

Os raios concordantes que limitam o ilhéu são de 0,5m, não existindo concordância no ponto final uma vez que está prevista a existência de lancis galgáveis visto tratar-se de uma zona residencial e da extensa dimensão da rotunda, o que causa necessidade de os peões fazerem o atravessamento ao longo do Ramo.

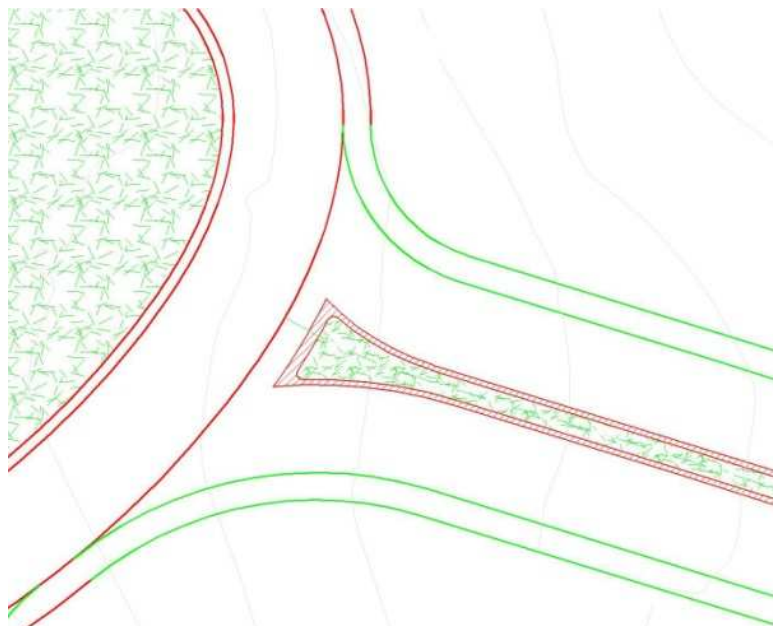


Fig. 27 - Construção das bermas e do ilhéu separador do Ramo B.

O Ramo C, por ser uma via exclusiva de saída da rotunda apenas apresenta bermas, não sendo necessária a construção de ilhéu separador.

Para impedir movimentos de viragem proibidos, e limitando o número de veículos que saem simultaneamente da rotunda ao número de vias disponíveis, neste caso, um veículo, as bermas não apresentam distâncias idênticas aos bordos da via.

Assim a berma da direita apresenta 2,5m e a berma da esquerda apresenta 1,0m conforme mostra a figura 28.

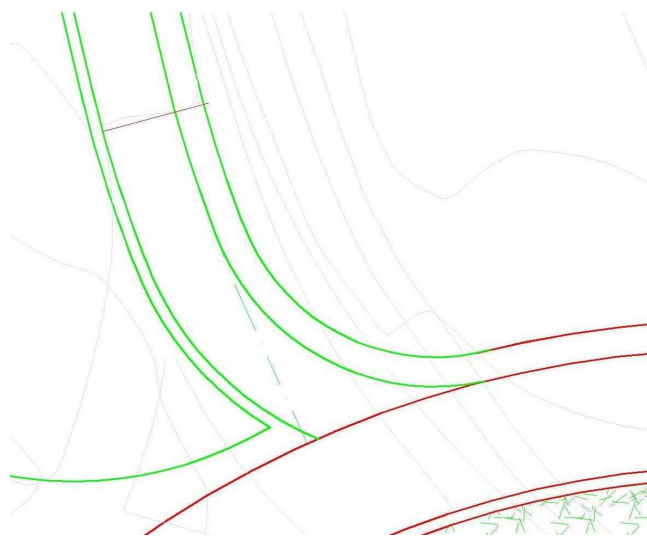


Fig. 28 - Construção das bermas do Ramo C.

A construção do Ramo D é feita à semelhança do Ramo B, com 2,5m de largura das bermas.

O ilhéu separador é construído através de "offsets" de 0,5m aos bordos interiores das vias e 1m da berma exterior da rotunda.

As concordâncias que delimitam o ilhéu apresentam raios de 0,5m, sendo este ilhéu galgável.

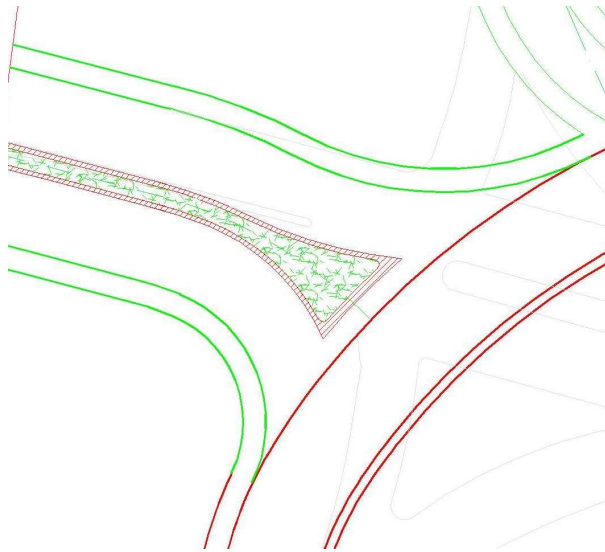


Fig. 29 - Construção das bermas e do ilhéu separador do Ramo D.

Verifica-se que a construção do Ramo E é muito semelhante à do Ramo C, uma vez que também não apresenta ilhéu separador. Isto acontece por existir apenas um sentido de circulação.

As bermas exteriores do ramo são construídas com a ajuda de “offsets” aos bordos da via.

A largura da berma da direita é de 2,5m, e a da esquerda 1,0m, de modo a que seja possível apenas a entrada de um veículo de cada vez na rotunda. Impedem-se assim aglomerações de veículos, em paralelo, na via de entrada.

A construção das bermas do ramo é apresentada na figura 30.



Fig. 30 - Construção das bermas do Ramo E.

4.4.TRAÇADO EM PERFIL LONGITUDINAL

4.4.1.ROTUNDA

A partir da directriz da rotunda que é definida pelo seu bordo exterior, extraíram-se as cotas do terreno. Estão apresentadas no anexo A.2 as cotas das curvas de nível, dos pontos altos, e de alguns pontos importantes para a definição mais fiel da topografia do terreno.

Para a construção do perfil longitudinal foi necessário proceder-se à recolha das cotas para intervalos de 10m (A.3). Na tabela 12, estão apresentadas as cotas do terreno nos pontos de inserção dos diversos ramos, assim como a distância à origem.

Tabela 12 - Cotas do terreno dos pontos de inserção dos ramos, na rotunda.

Km	Cotas	Pontos
0+000	38,650	Ramo A
0+049,598	42,331	Ramo B
0+161,823	37,594	Ramo C
0+195,823	35,953	Ramo D
0+258,596	34,946	Ramo E

Com os valores obtidos através das tabelas A.2 e A.3, traçou-se o perfil longitudinal do terreno, com a localização dos ramos, figura 31.

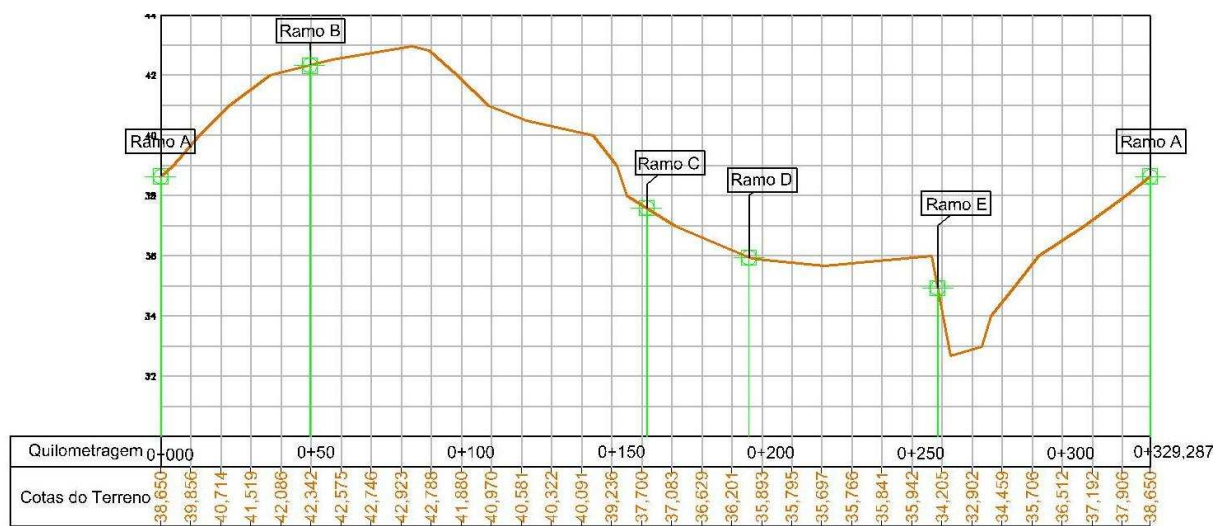


Fig. 31 - Representação do perfil longitudinal do terreno.

O perfil longitudinal da rotunda é composto por três trainéis, tendo o primeiro e o último trainel inclinações iguais. A transição entre trainéis é realizada com a ajuda de concordâncias verticais côncavas ou convexas conforme o caso.

Estipulou-se para a inclinação máxima longitudinal da rotunda o valor de 5,00%, tentando evitar atingir este valor.

As concordâncias verticais são definidas com parábolas de 2º grau que possibilitam uma maior simplicidade no cálculo. Uma vez que o raio mínimo é apenas atingido no vértice da parábola e face à variação do raio da curvatura ao longo da mesma, é possível implementar pequenas melhorias no que refere à visibilidade e à comodidade de circulação.

As concordâncias verticais convexas são condicionadas ao valor mínimo de 600m e as côncavas a 400m.

Para a definição da rasante é necessário ter em conta os condicionalismos referidos anteriormente, cota inicial do Ramo A fixada e que as alterações nos ramos já existentes fossem as menores possíveis, respeitando dentro do possível as cotas pré-existentes.

Logo, os trainéis 1 e 3 têm um dos pontos já fixado, a cota do Ramo A (39,360m) sendo a partir desta que se irá definir a inclinação longitudinal dos trainéis.

Tendo os trainéis 1 e 3 a mesma inclinação longitudinal optou-se por definir o trainel 3 fazendo com que a cota da rasante no Ramo E fosse o mais próximo da cota da estrada existente (36m).

O trainel 2 foi definido de modo a que nos Ramos C e D a cota da rasante estivesse o mais próximo possível da cota do terreno.

Como podemos verificar pela figura 32 o ponto mais baixo da rotunda situa-se entre o Ramo D e o Ramo E o que é coerente com a existência, nesse local, de uma passagem hidráulica.

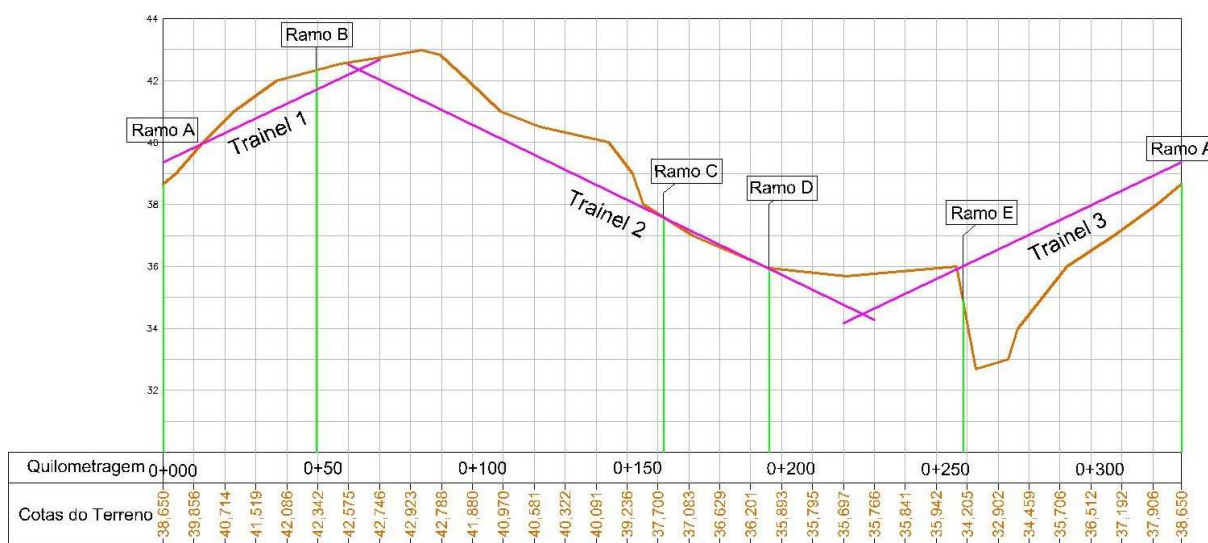


Fig. 32 - Rasante do terreno.

Devido à existência de três trainéis para fazer a passagem entre estes são necessárias duas concordâncias, sendo a primeira convexa e a segunda côncava.

Na figura 33 estão representados os elementos da concordância vertical, sendo D , o desenvolvimento da concordância vertical, medido em projecção ao longo do eixo dos xx ; i_1 , a inclinação da rasante na tangente de entrada; i_2 , a inclinação da rasante na tangente de saída e finalmente R , o valor do raio mínimo da parábola em que o sinal positivo fica associado a concordâncias convexas e o sinal negativo a concordâncias côncavas.

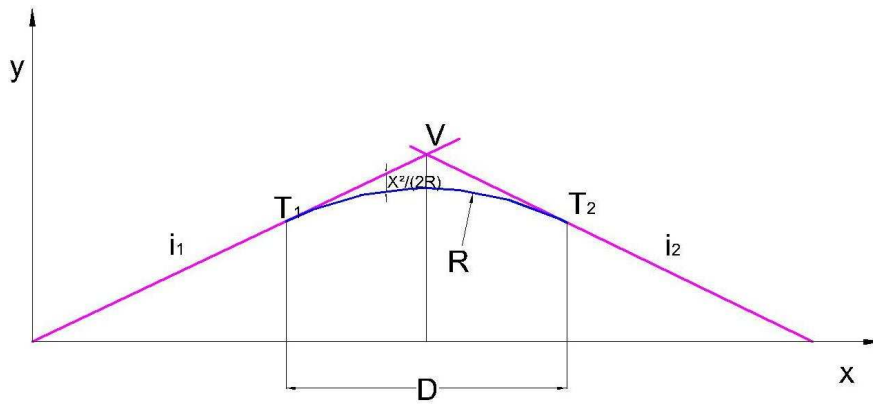


Fig. 33 - Elementos de uma concordância vertical convexa.

A expressão (23) relaciona o raio da concordância vertical com o seu desenvolvimento e inclinações dos trainéis anterior e posterior.

$$R = \frac{D}{i_1 - i_2} \quad (23)$$

Na figura 33, estão ainda representados os pontos de tangência trainel/concordância de entrada (T_1) e de saída (T_2) e V como o ponto onde os trainéis se intersectam, vértice.

Sendo definida como t , a distância na horizontal, do ponto de tangência trainel/concordância ao vértice V , a expressão (24) relaciona esta distância com a expressão (23).

$$t = \frac{R * (i_1 - i_2)}{2} \quad (24)$$

A expressão geral da concordância relativamente a um referencial ortogonal com origem no ponto de entrada da mesma é dada por:

$$y = i_1 * x - \frac{x^2}{2R} \quad (25)$$

O ponto mínimo ou máximo de uma concordância côncava ou convexa respectivamente, é dado pela expressão (26).

$$x = i * R \quad (26)$$

Para a definição da primeira concordância, é necessário saber as inclinações dos trainéis de montante e jusante, anteriormente definidos. Uma vez que a cota do Ramo A se mantém tentou-se que a cota do Ramo E ficasse a mais próxima possível da cota da estrada existente para minimizar as alterações necessárias. Deste modo obteve-se uma inclinação de 4,75% para os trainéis 1 e 3.

A inclinação atribuída ao trainel 2 é de 4,85%, para minimizar as alterações aos Ramos C e D.

Com as inclinações dos trainéis definidas e tomando como R o raio mínimo para as concordância verticais convexas, 600m, através da expressão (23) obtém-se o desenvolvimento total da primeira concordância.

$$600 = \frac{D}{0,0475 - (-0,0485)} \Leftrightarrow D = 57,60m$$

A distância, na horizontal, entre o vértice, V_1 , e os pontos de tangência trainel/concordância para a primeira concordância é dada por:

$$t = \frac{D}{2} \Leftrightarrow t = 28,80m$$

A localização do vértice V_1 , tabela 13, da primeira concordância é obtida pela intersecção do trainel 1, equação (27) com o trainel 2, equação (28), calculando-se assim a distância à origem e a cota do ponto.

$$y = 0,0475 * x + 39,36 \quad (27)$$

$$y = -0,0485 * x + 45,437 \quad (28)$$

Tabela 13 – Cota e distância à origem do vértice V_1 , da primeira concordância.

Km	Cotas
0+063,299	42,363

As distâncias à origem dos pontos de tangência T_1 e T_2 , são obtidos subtraindo e adicionando, respectivamente, a distância t à cota do vértice V_1 . A cota do ponto T_1 é obtida pela equação do trainel 1 (27), onde x é a distância à origem. A cota do ponto T_2 é obtida pela equação que se segue.

$$y = 40,999 + 0,0475 * 57,6 - \frac{57,6^2}{2 * 600}$$

Tabela 14 - Distâncias à origem dos pontos de tangência T_1 e T_2 .

Km	Cotas	Pontos
0+034,499	40,999	T_1
0+092,099	40,970	T_2

Na tabela 15 estão os resultados obtidos para a distância à origem do ponto mais alto da concordância que é dado pelo somatório da distância à origem do ponto de tangência T_1 com o resultado da equação (26), e a cota deste, que é dado pela equação que se segue.

$$y = 40,999 + 0,0475 * 28,5 - \frac{28,5^2}{2 * 600}$$

Tabela 15 - Distância à origem e cota do ponto mais alto da concordância.

Km	Cota
0+062,999	41,676

A segunda concordância é definida pelos trainéis 2 e 3, tendo estas inclinações longitudinais valores -4,85% e 4,75% respectivamente. Esta concordância vertical é côncava.

Com as inclinações dos trainéis definidas e tomando como t a distância do vértice ao Ramo E, e sabendo que o desenvolvimento da concordância é o dobro da distância t , o raio mínimo para a concordância é obtido pela equação que se segue.

$$t = 32,368 \Leftrightarrow R = \frac{2 * 32,368}{(-0,0485) - 0,0475} \Leftrightarrow R = -674,333m$$

A localização do vértice V_2 , tabela 17, da segunda concordância é obtida pela intersecção do trainel 2, equação (28) com o trainel 3, equação (29), obtendo-se assim a distância à origem e a cota do ponto.

$$y = 0,0475 * x + 23,719 \quad (29)$$

Tabela 16 - Cota e distância à origem do vértice V_2 , da segunda concordância.

Km	Cota
0+226,228	34,465

As distâncias à origem dos pontos de tangência T_3 e T_4 são obtidos subtraindo e adicionando, respectivamente, a distância t à cota do vértice V_2 . A cota do ponto T_3 é obtida pela equação do trainel 2 (28), onde x é a distância à origem. A cota do ponto T_4 é obtida pela equação que se segue, onde x corresponde à distância D , entre as tangentes.

$$y = 36,034 + (-0,0485) * 64,736 - \frac{64,736^2}{2 * (-674,333)}$$

Tabela 17 - Distâncias à origem e cotas dos pontos de tangência T_3 e T_4 .

Km	Cotas	Pontos
0+193,860	36,034	T_3
0+258,596	36,002	T_4

Na tabela 18 estão os resultados obtidos para a distância à origem do ponto mais baixo da concordância que é dado pelo somatório da distância do ponto de tangência T_3 com o resultado da equação (26). Para o raio correspondente a $-674,333\text{m}$, a cota é dada pela equação que se segue.

$$y = 36,034 + (-0,0485) * 32,705 - \frac{32,705^2}{2 * (-674,333)}$$

Tabela 18 - Distância à origem e cota do ponto mais baixo da segunda concordância.

Km	Cota
0+226,565	35,241

Na tabela 19 estão representados para todos os pontos notáveis, as características da rasante, e as cotas quer do terreno, quer da rasante, a tabela completa para todos os pontos ao longo do perfil longitudinal está apresentada no anexo A.4.

Tabela 19 – Tabela resumo das características da rasante, dos pontos notáveis.

Km	R (m)	i(%)	Equação da recta	Cotas terreno	Cotas rasante	Pontos notáveis
0+0+000	∞	4,75	$y = 39,360 + ix$	38,650	36,390	Ramo A
0+034,499				-	40,999	T_1
0+049,598	600	4,75	$y = 40,999 + ix - \frac{x^2}{2R}$	42,331	41,526	Ramo B
0+062,999				-	41,676	Ponto mais alto

Km	R (m)	i(%)	Equação da recta	Cotas terreno	Cotas rasante	Pontos notáveis
0+092,099				-	40,970	T ₂
0+161,706	∞	-	$y = 40,970 + ix$	37,594	37,594	Ramo C
0+193,860		4,85		-	36,034	T ₃
0+195,823				35,953	35,942	Ramo D
0+226,562	674,333	-	$y = 36,034 + ix - \frac{x^2}{2R}$	-	35,241	Ponto mais baixo
0+258,596		4,85		34,946	36,002	Ramo E (T ₄)
0+329,287	∞	4,75	$y = 36,002 + ix$	38,650	39,360	Ramo A

A sobrelevação máxima aconselhada para uma rotunda é em valor absoluto de 2,5%. Ao longo da extensão de 20m o disfarce da sobrelevação não deve exceder 5,0%.

A sobrelevação dos pontos de inserção dos Ramos na rotunda, corresponde à inclinação longitudinal. Sabendo que o perfil longitudinal dos Ramos A, B e C é em declive, definiu-se para os pontos de inserção na rotunda a sobrelevação máxima de - 2,5%, enquanto para os restantes Ramos, D e E, como convergem em rampa para a rotunda, optou-se por adoptar a sobrelevação de 2,5%, procurando assim conseguir maiores raios par o mesmo desenvolvimento.

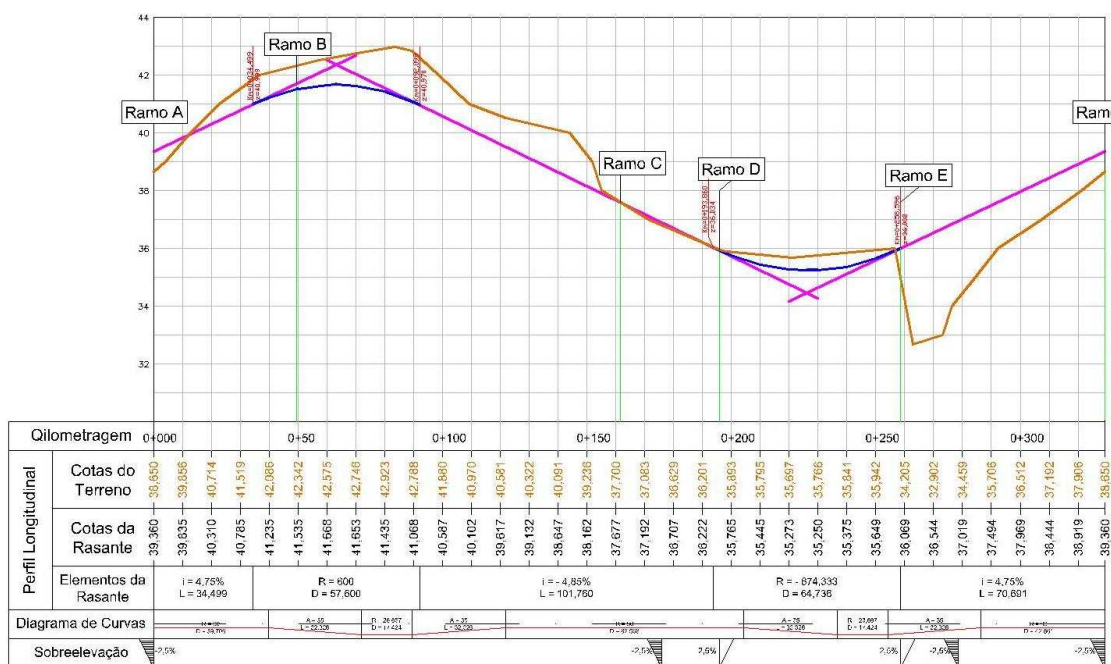


Fig. 34 - Perfil longitudinal da rotunda, com as respectivas sobrelevações.

4.4.2.RAMO A

Sendo a cota inicial do Ramo A, a condicionante mais severa do projecto, a rotunda foi projectada de modo a que o perfil longitudinal deste Ramo não fosse alterado.

Aquando do início do projecto foi facultado a planta do local a projectar a rotunda juntamente com o perfil longitudinal do Ramo A. Neste ramo não foi necessário introduzir qualquer modificação, uma vez que o trainel de entrada no ramo estava de acordo com a sobrelevação da rotunda, ou seja, o trainel inicial deste ramo apresenta inclinação de 2,5% como se verifica pela figura 35.

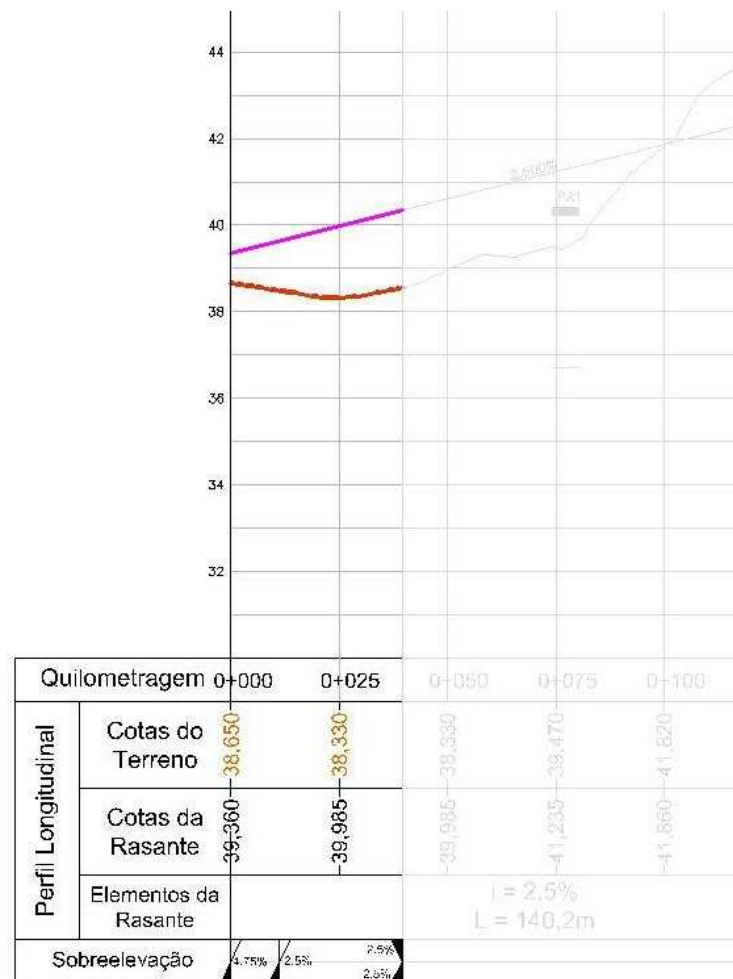


Fig. 35 - Perfil longitudinal do Ramo A.

A inclinação transversal inicial do perfil do Ramo A será correspondente à inclinação longitudinal da rotunda no ponto de inserção do ramo.

Através da figura 35 verificamos que o Ramo A intersecta o perfil longitudinal da rotunda no primeiro trainel. A sobrelevação inicial do ramo corresponde à inclinação do trainel, ou seja 4,75%. A inclinação transversal final corresponde ao perfil em alinhamento recto, ou seja, -2,5% e 2,5%. Ao longo de 20m do perfil longitudinal do ramo a máxima variação do disfarce da sobrelevação é de 4%.

4.4.3. RAMO B

O perfil longitudinal do Ramo B é obtido através da piquetagem das cotas do terreno. O perfil foi construído a partir do ponto de inserção na rotunda, seguindo os quilómetros crescentes ao longo da directriz do ramo.

O perfil longitudinal do terreno (rasante do ramo pré-existente) está representado na figura 36.

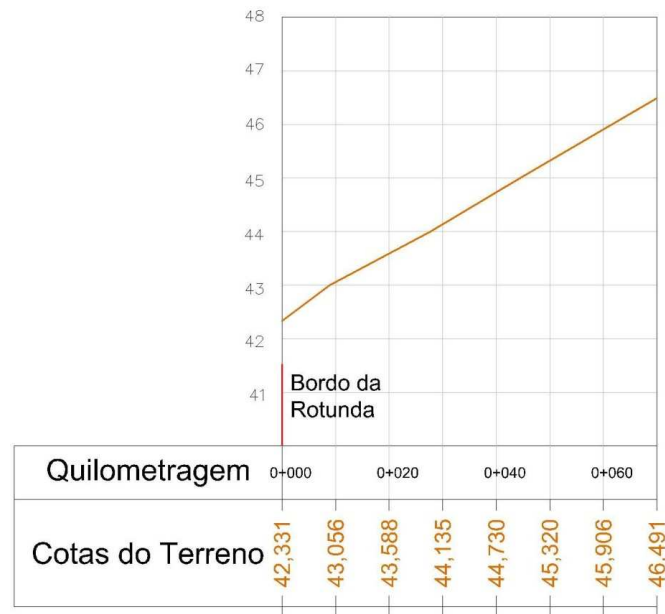


Fig. 36 - Perfil longitudinal do terreno pré-existente do Ramo B.

A nova rasante foi construída a partir do ponto de inserção na rotunda, cujo trainel inicial tem que ter a mesma inclinação longitudinal que a sobrelevação da rotunda nesse ponto. Ou seja, a inclinação longitudinal do trainel inicial desta rasante terá que ser de 2,5%.

A inclinação do segundo trainel foi definida de modo iterativo. Pretende-se que a intersecção do trainel com a rasante antiga seja a mais rápida possível, de modo a construir uma concordância com raio mínimo de 400m. Ficou assim a inclinação do segundo trainel definida nos 8,0%.

Com o primeiro e o segundo trainel definidos, podemos agora construir a concordância que irá fazer a ligação entre estes dois trainéis.

Para além das inclinações dos trainéis definiu-se também a distância t , que corresponde à distância medida na horizontal entre o vértice e o ponto de tangência trainel/concordância. Esta distância t deve ser a menor possível, logo é a distância desde o ponto inicial do primeiro trainel até ao vértice.

O raio mínimo da concordância é dado por:

$$t = 6,660 \Leftrightarrow R = \frac{2 * 6,660}{0,025 - 0,08} \Leftrightarrow R = -242,182 m$$

A distância à origem do vértice V_I desta primeira concordância, é dada pela distância t , ou seja, situa-se a 6,660m. A cota do ponto é obtida pela intersecção das expressões das rectas do primeiro e segundo trainéis, equações (30) e (31), respectivamente.

$$y = 0,025 * x + 41,526 \quad (30)$$

$$y = 0,08 * x + 41,160 \quad (31)$$

Na tabela 20 está apresentada a distância à origem e a respectiva cota do vértice V_I da primeira concordância.

Tabela 20 - Distância à origem e cota do ponto V_I .

Km	Cota
0+006,660	41,692

O primeiro ponto de tangência trainel/concordância T_I está já definido como sendo o ponto inicial do primeiro trainel, ou seja situa-se no quilómetro 0+000. A cota é a previamente definida na rasante do perfil longitudinal da rotunda para a inserção do Ramo B, ou seja, 41,526m.

O segundo ponto de tangência T_2 dista da origem o dobro da distância t , a cota é obtida pela expressão de seguida apresentada:

$$y = 41,526 + 0,025 * 13,32 - \frac{13,32^2}{2 * (-242,182)}$$

A tabela 21 apresenta as distâncias à origem dos pontos de tangência da primeira concordância assim como as cotas pertencentes.

Tabela 21 - Distâncias à origem e cotas dos pontos de tangência T_1 e T_2 .

Km	Cotas	Pontos
0+000	41,526	T_1
0+013,32	42,225	T_2

A segunda concordância é definida pelo segundo trainel e pela rasante a manter do ramo. A inclinação do último trainel é obtido pela diferença de cotas do terreno natural, obteve-se assim a inclinação de 5,855%.

Para esta segunda concordância optou-se por estabelecer o raio mínimo de 400m, calculando-se de seguida o desenvolvimento D da concordância.

$$D = 400 * (0,08 - 0,05855) \Leftrightarrow D = 8,58m$$

A distância à origem e a cota do vértice V_2 são obtidas através da intersecção das equações das rectas do segundo e último trainéis, expressões (31) e (32) respectivamente.

$$y = 0,05855 * x + 42,393 \quad (32)$$

Na tabela 22 está apresentada a distância à origem e a respectiva cota do vértice V_2 da segunda concordância.

Tabela 22 – Distância à origem e cota do vértice V_2 .

Km	Cota
0+057,482	45,758

As distâncias à origem dos pontos de tangência trainel/concordância são obtidas somando e subtraindo metade da distância D à distância do vértice V_2 .

A cota do ponto T_3 é obtida através da equação que se segue onde a cota inicial é a cota do ponto T_2 e x é a distância entre estes dois pontos.

$$y = 42,225 + 0,08 * 39,864$$

A cota do último ponto de tangência T_4 é obtida pela seguinte equação:

$$y = 45,414 + 0,08 * 8,58 - \frac{8,58^2}{2 * 400}$$

A tabela 23 apresenta as distâncias à origem dos pontos de tangência da segunda concordância assim como as cotas pertencentes.

Tabela 23 - Distâncias à origem e cotas dos pontos de tangência T₃ e T₄.

Km	Cotas	Pontos
0+053,184	45,414	T ₃
0+061,764	46,009	T ₄

Na figura 37 está representado o perfil longitudinal do Ramo B com os respectivos trainéis e concor-
dâncias definidas.

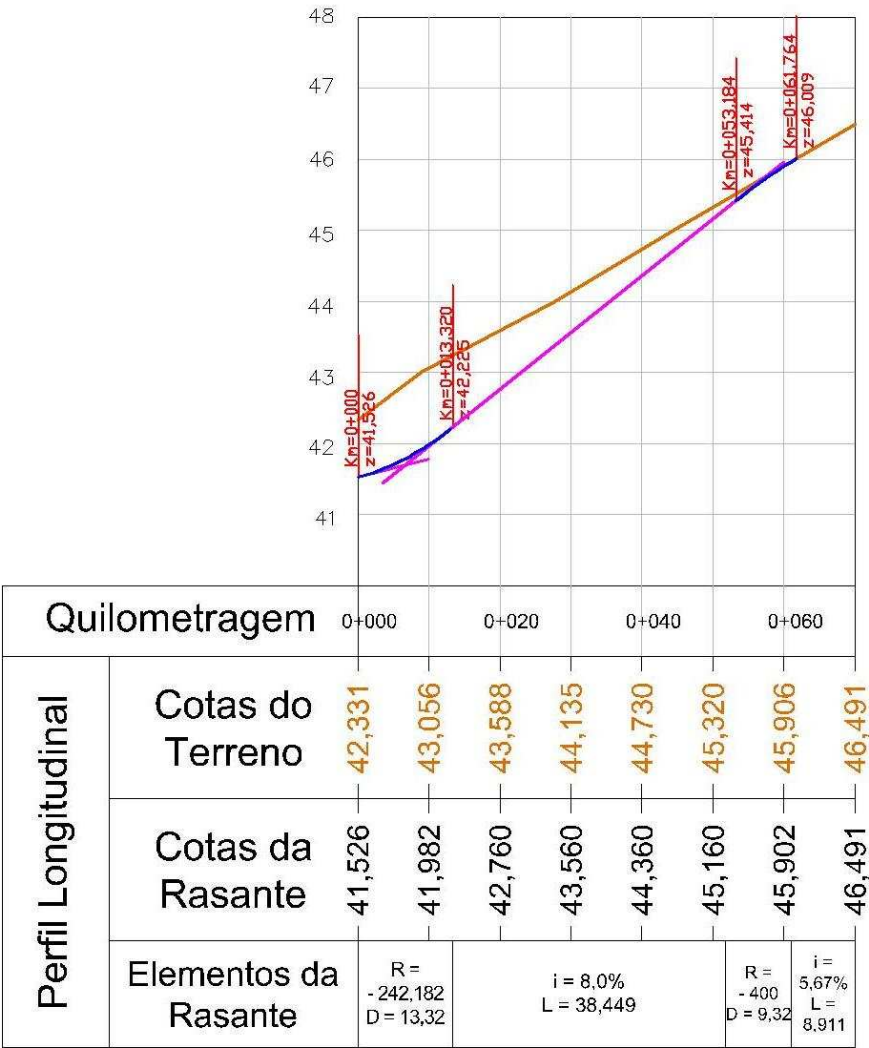


Fig. 37 - Perfil longitudinal do Ramo B.

O ponto de inserção do Ramo B no perfil longitudinal da rotunda dá-se em plena concordância. Neste caso, derivando a expressão da concordância (33), obteve-se a expressão (34), em que y' corresponde à inclinação transversal do ramo.

$$y = y_i + i_1 * x - \frac{x^2}{2 * R} \quad (33)$$

$$y' = i_1 - \frac{x_{T_1}}{R_1} \quad (34)$$

Para o caso do Ramo B, i_1 é a inclinação do primeiro trainel, x_{T_1} é a distância do ramo ao primeiro ponto de tangência trainel/concordância (T_1), e R_1 é o raio mínimo da primeira concordância.

A inclinação transversal inicial do ramo é dada por:

$$y' = 0,0475 - \frac{15,099}{600} \Leftrightarrow y' = 2,234\%$$

A inclinação transversal final do perfil foi obtida através da piquetagem dos pontos correspondentes ao eixo, lado direito e esquerdo da via para a distância de 70m (tabela 24).

Sabendo a largura da via, 9,742m, pode-se calcular as inclinações correspondentes a cada via.

Tabela 24 – Cotas das bermas e eixo da via.

Cesq	Ceixo	Cdir
46,514	46,491	46,458
0,236%	-	0,339%

A máxima variação do disfarce da sobrelevação é de 4% ao longo de 20 m. Para a via da direita, a distância necessária para o disfarce é:

$$L = (0,339 - 2,234) * \frac{20}{4} \Leftrightarrow L = 9,475m$$

Para a via da esquerda a distância necessária é:

$$L = (0,236 - 2,234) * \frac{20}{4} \Leftrightarrow L = 9,99m$$

A figura 38 mostra a variação da sobrelevação ao longo do perfil longitudinal do Ramo B.

Quilometragem	0+000	0+020	0+040	0+060
Sobrelevação	2,234%	0,236%	0,339%	0,236%

Fig. 38 - Sobrelevação ao longo do Ramo B.

4.4.4. RAMO C

A partir do levantamento das cotas do terreno é obtido o perfil longitudinal da rasante do Ramo C pré existente. O perfil foi construído a partir do ponto de inserção na rotunda, seguindo os quilómetros crescentes ao longo da directriz do ramo.

O perfil longitudinal do terreno do Ramo C está representado na figura 39.

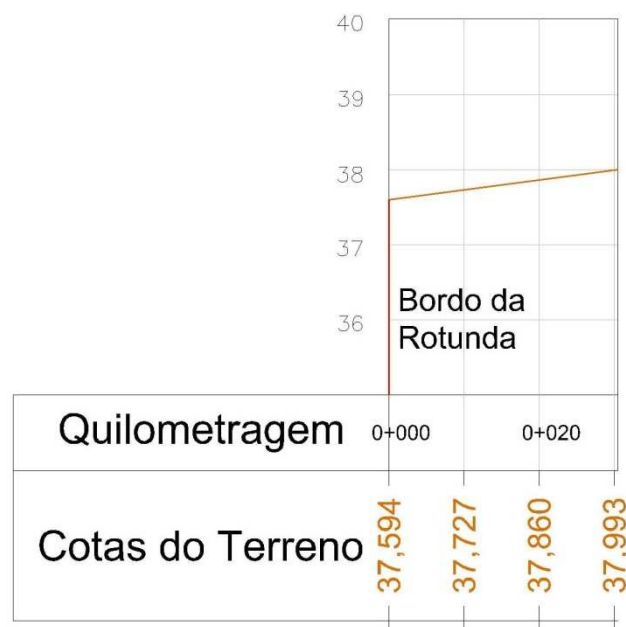


Fig. 39 - Perfil longitudinal do terreno pré existente do Ramo C.

Apesar de a cota inicial do terreno e a cota de inserção na rotunda terem o mesmo valor, terá que haver uma pequena alteração no perfil longitudinal do ramo. O trainel inicial deste terá que ter a mesma inclinação que a sobrelevação da rotunda.

Para a construção da rasante foi necessário utilizar dois trainéis, o primeiro com 2,5% de inclinação, o segundo com 1% de inclinação. Deste modo consegue-se a transição mais rápida para a cota do terreno existente.

Para fazer a transição de um trainel para outro é necessário definir uma concordância, cujo desenvolvimento seja o menor possível.

A concordância para além das inclinações longitudinais dos trainéis ficou também definida pela distância desde o início do primeiro trainel, Km 0+000, até ao vértice (distância t), cujo valor é de 6,613m. Com este valor é possível definir o desenvolvimento total da concordância, que corresponde ao dobro da distância entre o ponto de tangência e o vértice.

O raio mínimo da concordância é determinado pela equação que a seguir se apresenta:

$$t = 6,613 \Leftrightarrow R = \frac{2 * 6,613}{0,025 - 0,01} \Leftrightarrow R = 881,733m$$

O primeiro ponto de tangência trainel/concordância T_1 está já definido como sendo o ponto inicial do primeiro trainel, Km 0+000, e cota 37,594m. Sendo esta a cota definida na rasante do perfil longitudinal da rotunda para o ponto de inserção do Ramo C.

O segundo ponto de tangência T_2 dista da origem 13,226m, o dobro da distância t , e a cota é obtida pela expressão de seguida apresentada:

$$y = 37,594 + 0,025 * 13,226 - \frac{13,226^2}{2 * (881,733)}$$

A tabela 25 apresenta as distâncias à origem dos pontos de tangência da concordância assim como as pertencentes cotas.

Tabela 25 -. Distâncias à origem e cotas dos pontos de tangência T_1 e T_2 .

Km	Cotas	Pontos
0+000	37,594	T_1
0+013,226	37,825	T_2

A distância à origem do vértice V_l da concordância é dada pela distância t , ou seja, situa-se a 6,613m. A cota do ponto é obtida pela intersecção das equações das rectas do primeiro e segundo trainéis, equações (35) e (36) respectivamente.

$$y = 0,025 * x + 37,594 \quad (35)$$

$$y = 0,01 * x + 37,693 \quad (36)$$

Na tabela 26 está apresentada a distância à origem e a respectiva cota do vértice V_1 .

Tabela 26 - Distância à origem e cota do ponto V_1 .

Km	Cota
0+006,613	37,759

Na figura 40 está representado o perfil longitudinal do Ramo C, cuja rasante é definida pelos trainéis acima descritos, pela concordância que é formada entre os mesmo e pelos pontos de tangência trainel/concordância.

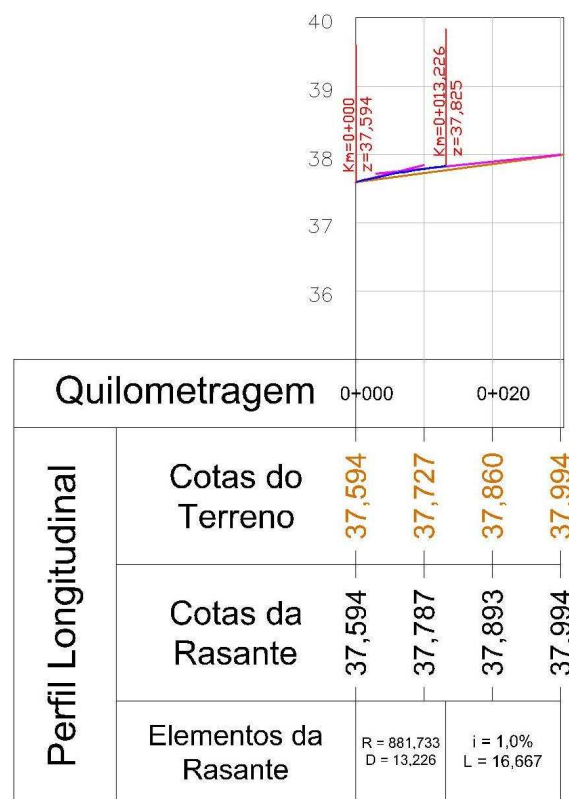


Fig. 40 - Perfil longitudinal do Ramo C.

A inclinação transversal inicial do perfil do Ramo C, à semelhança do que acontece com o Ramo A, intersecta o perfil longitudinal da rotunda no segundo trainel, sendo a sobreelevação inicial do Ramo C correspondente à inclinação do trainel -4,85%.

A inclinação transversal final do Ramo C, é obtida a partir da piquetagem dos bordos da via para o ponto final do perfil longitudinal, ou seja, para uma distância de 30,484m a partir do ponto de inserção na rotunda. A inclinação obtida é de 0%, e a passagem da inclinação inicial para esta inclinação tem que ser realizada moderadamente sem nunca ultrapassar variação de 4% em 20m.

Logo, o comprimento mínimo necessário para que a inclinação transversal de -4,85% passe para 0% é:

$$L = (0 - (-4,85)) * \frac{20}{4} \Leftrightarrow L = 24,25m$$

A figura 41 mostra a variação da sobreelevação ao longo do perfil longitudinal do Ramo C.

Quilometragem	0+000	0+020
Sobreelevação	-4,85%	0% 0%

Fig. 41 - Sobreelevações ao longo do Ramo C.

4.4.5.RAMO D

O perfil longitudinal do terreno para o Ramo D é obtido de modo análogo aos restantes ramos, a partir do levantamento das cotas do terreno. O perfil foi construído a partir do ponto de inserção na rotunda seguindo os quilómetros crescentes ao longo da directriz do ramo.

O perfil longitudinal do terreno do Ramo D pré-existente está representado na figura 42.

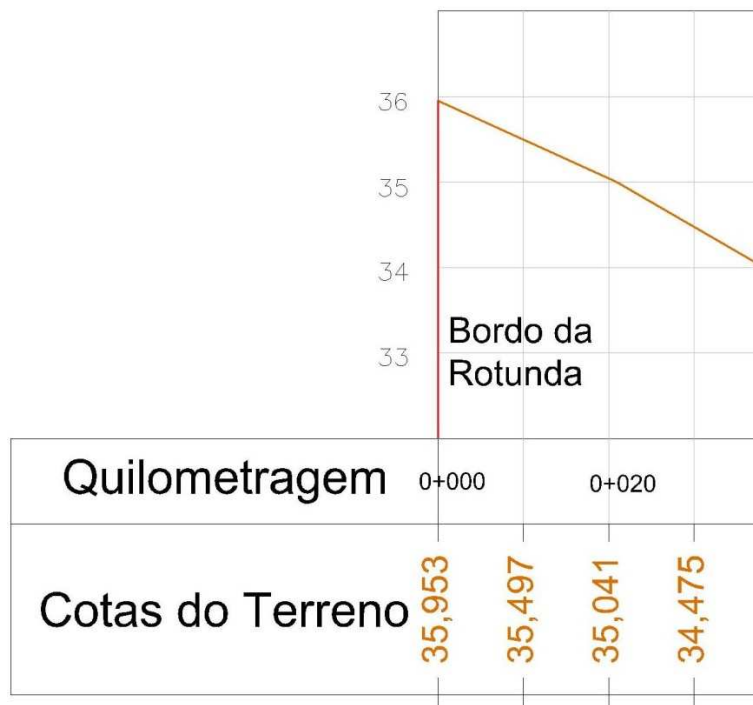


Fig. 42 - Perfil longitudinal do terreno do Ramo D.

A rasante é constituída por dois trainéis em que o trainel inicial, como já foi referido, tem que ter a mesma inclinação que a sobreelevação do perfil longitudinal da rotunda no ponto de inserção do Ramo D, e o segundo trainel tem a inclinação dos pontos finais do terreno.

Os trainéis ficaram assim definidos, tendo o primeiro -2,5% de inclinação, e o segundo -5,758% de inclinação.

Para a concordância que une estes dois trainéis, optou-se por estabelecer o raio mínimo de 100m, calculando-se de seguida o desenvolvimento D da concordância.

$$D = 100 * (-0,025 - (-0,05758)) \Leftrightarrow D = 3,258m$$

A distância à origem e a cota do vértice V_I são obtidos através da intersecção das equações das rectas correspondentes aos trainéis, equações (37) e (38) respectivamente.

$$y = -0,025 * x + 35,942 \quad (37)$$

$$y = -0,05758 * x + 36,203 \quad (38)$$

Na tabela 27 está apresentada a distância à origem e a respectiva cota do vértice V_I .

Tabela 27 - Distância à origem e respectiva cota do vértice V_I .

Km	Cota
0+008,01	35,742

As distâncias à origem dos pontos de tangência trainel/concordância são obtidos somando e subtraindo metade da distância D à distância do vértice V_I .

A cota do primeiro ponto de tangência T_I é obtida através da equação que se segue, onde a distância à origem, x , é dada subtraindo metade da distância total da concordância à distância do vértice à origem

$$y = 35,942 - 0,025 * 6,381$$

A cota do último ponto de tangência T_2 é obtida pela seguinte equação:

$$y = 35,782 - 0,025 * 3,258 - \frac{3,258^2}{2 * 100}$$

A tabela 28 apresenta as distâncias à origem dos pontos de tangência da segunda concordância assim como as cotas pertencentes.

Tabela 28 - Distâncias à origem e cotas dos pontos de tangência.

Km	Cotas	Pontos
0+006,381	35,782	T ₁
0+009,639	35,648	T ₂

A figura 43 representa o perfil longitudinal do Ramo D, assim como os elementos que o definem.

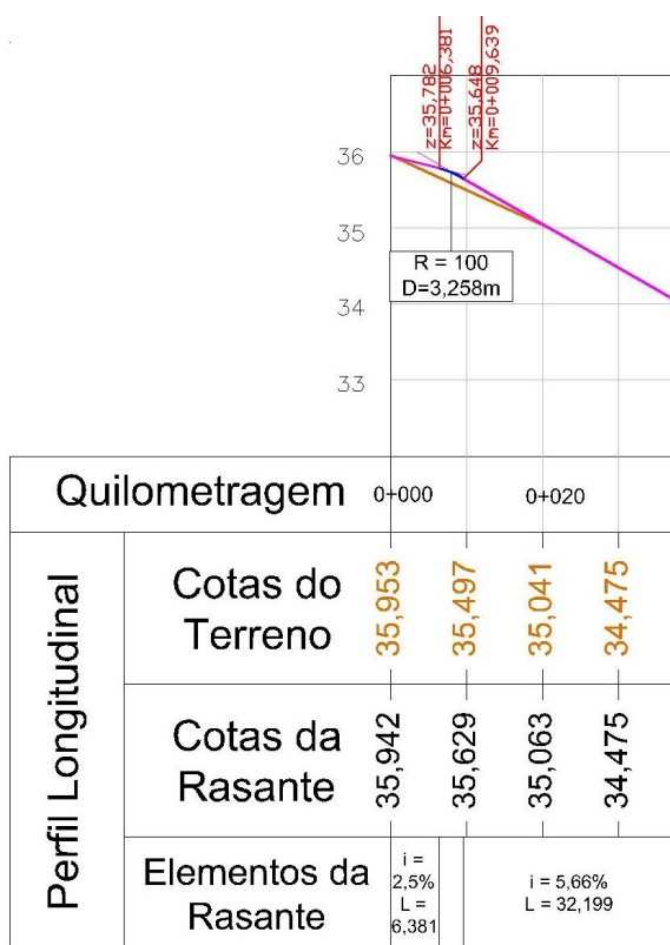


Fig. 43 - Perfil longitudinal do Ramo D.

O Ramo D à semelhança do que acontece com o Ramo B, insere-se no perfil longitudinal da rotunda na segunda concordância.

A inclinação transversal inicial do Ramo D é obtida de acordo com a expressão (39), onde i_2 é a inclinação do segundo trainel, x_{T3} é a distância do ponto de inserção do ramo ao primeiro ponto de

tangência trainel/concordância (T_3) da segunda concordância, e R_2 é o raio mínimo da segunda concordância.

$$y' = i_2 - \frac{x_{T_3}}{R_2} \quad (39)$$

Substituindo os valores, obtém-se:

$$y' = -0,0485 - \frac{1,963}{-674,333} \Leftrightarrow y' = -4,559\%$$

A inclinação transversal final do perfil foi obtida através da piquetagem dos pontos correspondentes ao eixo, lado direito e esquerdo da via para a distância que corresponde ao final do perfil, 38,25m (tabela 29).

Conhecendo a largura da via, 9,42m, é possível calcular as inclinações correspondentes a cada via.

Tabela 29 - Cotas das bermas e eixo da via.

Cesq	Ceixo	Cdir
33,844	34,000	33,993
-1,656%	-	0,07%
		≈0%

A máxima variação do disfarce da sobrelevação é de 4% ao longo de 20 m.

Para a via da direita, a distância necessária para o disfarce é:

$$L = (0 - (-4,559)) * \frac{20}{4} \Leftrightarrow L = 22,795m$$

Para a via da esquerda a distância necessária é:

$$L = (-1,656 - (-4,559)) * \frac{20}{4} \Leftrightarrow L = 14,515m$$

A figura 44 mostra a variação da sobrelevação ao longo do perfil longitudinal do Ramo D.

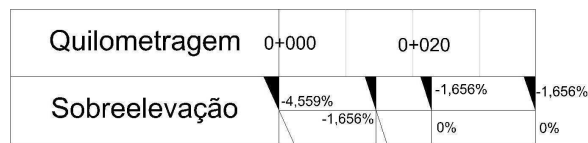


Fig. 44 - Sobrelevações ao longo do Ramo D.

4.4.6.RAMO E

O perfil longitudinal da rasante do terreno pré-existente do Ramo E é obtido a partir do levantamento das cotas do terreno. O perfil foi construído a partir do ponto de inserção na rotunda, seguindo os quilómetros crescentes ao longo da directriz do ramo.

O perfil longitudinal do terreno do Ramo E está representado na figura 45.

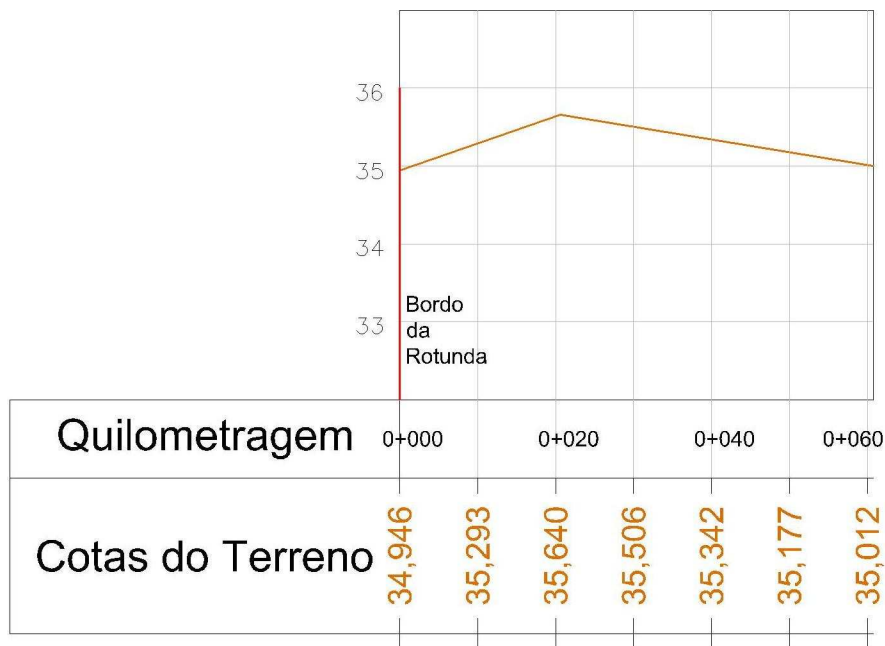


Fig. 45 - Perfil longitudinal do terreno pré-existente do Ramo E.

Para a construção da rasante foi necessário utilizar dois trainéis, o primeiro tem -2,5% de inclinação, devido à sobrelevação do perfil longitudinal da rotunda, e o segundo tem -1,5% de inclinação até ao ponto em que se intersecta com o terreno natural.

Para fazer a transição de um trainel para outro é necessário definir uma concordância, cujo desenvolvimento seja o menor possível.

A concordância dos dois primeiros trainéis para além das inclinações longitudinais é também definida pela distância desde o início do primeiro trainel, Km 0+000, até ao vértice (distância t) cujo valor é de 3,339m.

Com este valor é possível definir o desenvolvimento total da concordância, que corresponde ao dobro da distância entre o ponto de tangência e o vértice, o raio mínimo da concordância é determinado pela equação que a seguir se apresenta:

$$t = 3,339 \Leftrightarrow R = \frac{2 * 3,339}{-0,025 - (-0,015)} \Leftrightarrow R = -667,80m$$

O primeiro ponto de tangência trainel/concordância T_1 é definido como sendo o ponto inicial do primeiro trainel, Km 0+000, e cota 36,002m. Sendo esta a cota definida na rasante do perfil longitudinal da rotunda para o ponto de inserção do Ramo E.

O segundo ponto de tangência T_2 dista da origem 6,678m, o dobro da distância t , e a cota é obtida pela expressão de seguida apresentada:

$$y = 36,002 - 0,025 * 6,678 - \frac{6,678^2}{2 * (-667,80)}$$

A tabela 30 apresenta as distâncias à origem dos pontos de tangência da concordância assim como as cotas pertencentes.

Tabela 30 - Distâncias à origem e cotas dos pontos de tangência T_1 e T_2 .

Km	Cotas	Pontos
0+000	36,002	T_1
0+006,678	35,868	T_2

A distância à origem do vértice V_I da concordância, é dada pela distância t , ou seja, situa-se a 3,339m. A cota do ponto é obtida pela intersecção das equações das rectas do primeiro e segundo trainéis, equações (40) e (41) respectivamente.

$$y = -0,025 * x + 36,002 \quad (40)$$

$$y = -0,015 * x + 35,969 \quad (41)$$

Na tabela 31 está apresentada a distância à origem e a respectiva cota do vértice V_1 .

Tabela 31 - Distância à origem e cota do ponto V_1 .

Km	Cota
0+003,339	35,920

Relativamente à segunda concordância, que ligaria o segundo trainel com -1,5% de inclinação com o terreno natural que apresenta -1,65%, optou-se por não construir, uma vez que, adoptando 100m para o raio mínimo, o desenvolvimento total da concordância iria ser de 0,15m, sendo este um valor tão pequeno que se torna imperceptível a quem viaja na estrada.

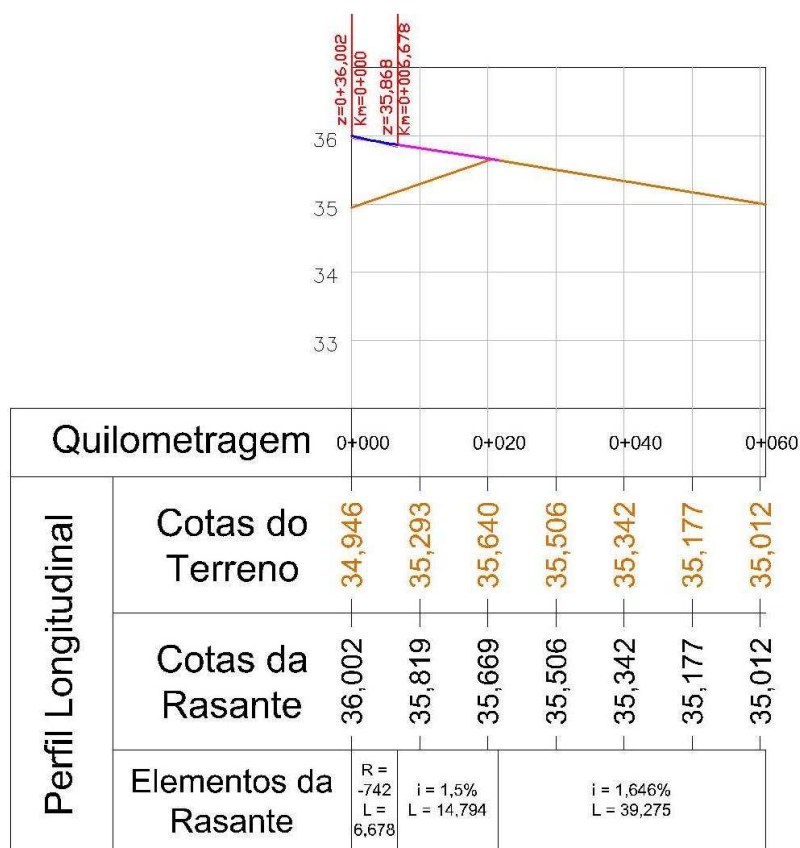


Fig. 46 - Perfil longitudinal do Ramo E.

O ponto de inserção do Ramo E no perfil longitudinal da rotunda localiza-se no último trainel, sendo a inclinação transversal do Ramo correspondente à inclinação do trainel, ou seja, 4,75%.

A inclinação transversal final do Ramo E, é obtida a partir da piquetagem dos bordos da via para o ponto final do perfil longitudinal, tabela 32.

Conhecendo a largura da via, 6,419m, é possível calcular a inclinação transversal final da via.

Tabela 32 – Cotas das bermas da via.

Ceixo	Cdir
35,000	34,829
2,664%	

O comprimento mínimo necessário para que a inclinação transversal de 4,75% diminua para 2,664% é:

$$L = (2,664 - 4,75) * \frac{20}{4} \Leftrightarrow L = 10,43m$$

A figura 47 mostra a variação da sobreelevação ao longo do perfil longitudinal do Ramo E.

Quilometragem	0+000	0+020	0+040	0+060
Sobreelevação	4,75%	2,664%		2,664%

Fig. 47 - Sobreelevações ao longo do Ramo E.

5

CONCLUSÃO

A solução final para o traçado da rasante da rotunda foi definida de acordo com o Estudo Prévio, de modo a que os ramos sofressem o menor número de alterações necessárias, e que o Ramo A, não sofresse qualquer alteração.

Sendo a cota inicial do Ramo A a condicionante mais severa do projecto, uma vez que a cota da rotunda no ponto de inserção tem que manter a continuidade sem exceder os limites máximos das inclinações longitudinais permitidos pelas Normas da Ex-JAE (5%), a rotunda apresenta a forma “quase-elipse”, que é composta pelo conjunto de circunferências e clotóides.

Com a solução apresentada neste Projecto de Execução consegue-se que o Ramo A não sofra qualquer alteração, mantendo o seu perfil longitudinal inalterado.

As alterações nos restantes ramos ficam a dever-se a cotas não coincidentes no local de inserção na rotunda. De forma a reduzir os custos de obra as alterações a efectuar são minimalistas.

Foi necessário alterar o traçado do Ramo B de modo a provocar uma pequena deflexão na trajectória de aproximação á rotunda. Relativamente ao perfil longitudinal houve a necessidade de acentuar o declive da rasante, visto que a diferença de cotas entre a rotunda e o terreno era notória. Este ramo é o que envolve maior movimentação de terras devido a escavações.

Neste ramo optou-se por fazer com que as todas as vias, quer de entrada, quer de saída tivessem a mesma largura para evitar a aglomeração de veículos. Para além disso preferiu-se fazer a separação dos sentidos com a ajuda de lancis galgáveis pelo facto de se tratar de uma zona habitacional.

O Ramo C é constituído por uma via exclusiva de saída da rotunda, a qual também sofreu alterações na deflexão da trajectória para permitir o ângulo de saída correcto dos veículos da rotunda. Devido á existência de apenas uma via, este ramo não necessita de ilhéu separador, apresentando apenas bermas da via. Ao contrário do ramo anterior, o perfil longitudinal do Ramo C permanece quase inalterado sendo a movimentação de terra mínima.

O Ramo D, á semelhança do que acontece com o Ramo B, é constituído por quatro vias, as quais apresentam a mesma largura, e ostenta também um ilhéu separador semelhante ao Ramo B. O perfil longitudinal do ramo apresenta um pequeno aterro.

Finalmente o Ramo E é semelhante ao Ramo C, sendo constituído por uma via exclusiva de entrada na rotunda, cujo traçado teve que ser alterado de modo a provocar uma deflexão da trajectória, que provoca a redução natural da velocidade de aproximação dos veículos à rotunda. Seguido ao Ramo B, este ramo é o que envolve maiores movimentações de terras.

Esta solução permite harmonia entre segurança e conforto, sendo asseguradas as inclinações máximas e velocidades permitidas pelas Normas da EX-JAE, e cumpre também todas as condicionantes do projecto, conseguindo que os custos envolvidos sejam os menores possíveis.

BIBLIOGRAFIA

- [1] França, Adalberto. *Apontamentos de Vias de Comunicação 1*. Faculdade de Engenharia, Porto.
- [2] França, Adalberto. *Apontamentos de Vias de Comunicação 2*. Faculdade de Engenharia, Porto.
- [3] França, Adalberto. *Tópicos e Resumos de Complementos de Estradas e Aeródromos*.
- [4] *Norma de Traçado*. JAE, 1992
- [5] *Norma de Intersecções*. JAE, P5/90
- [6] Bastos Silva, A.M.C., et al, *Dimensionamento de Rotundas*, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Coimbra, 1999

6

ANEXOS

6.1. DEFINIÇÃO DA ELIPSE

A 1 - Piquetagem da curva em clóide.

x	L	y	Pontos
A=35			
13,603	13,611	0,343	CC _G
14	14,009	0,374	
15	15,013	0,460	
16	16,018	0,559	
17	17,024	0,671	
18	18,032	0,797	
19	19,042	0,938	
20	20,054	1,095	
21	21,069	1,269	
22	22,087	1,462	
23	23,110	1,674	
24	24,136	1,905	
25	25,168	2,159	
26	26,205	2,435	
27	27,249	2,735	

X	L	y	Pontos
28	28,301	3,061	
28	29,362	3,414	
30	30,432	3,796	
31	31,514	4,208	
32	32,609	4,655	
33	33,719	4,903	
34	34,846	5,656	
35	35,993	6,218	
36	37,164	6,827	
37	38,361	7,485	
38	39,590	8,199	
39	40,856	8,975	
40	42,167	9,823	
41	43,533	10,754	
42	44,966	11,781	
42,646	45,937	12,506	CC _P

6.2.PERFIL LONGITUDINAL

6.2.1. PERFIL LONGITUDINAL DA ROTUNDA

A 2 - Piquetagem dos pontos notáveis do terreno da rotunda.

X	Cotas
0+000	38,650
0+004,208	39,000
0+012,893	40,000
0+022,850	41,000
0+036,619	42,000
0+038,207	42,080
0+057,341	42,529
0+072,032	42,781
0+083,524	42,986
0+089,456	42,837
0+098,740	42,000
0+109,235	41,000
0+121,782	40,512
0+143,925	40,000
0+151,877	39,000

X	Cotas
0+155,130	38,000
0+171,335	37,000
0+194,690	36,000
0+198,410	35,909
0+220,983	35,687
0+242,565	36,000
0+256,599	36,000
0+273,212	33,000
0+262,878	32,686
0+276,270	34,000
0+284,392	35,000
0+292,340	36,000
0+307,306	37,000
0+307,306	38,000

A 3 - Cotas do terreno espaçados 10m.

x	Cotas
0+000	38,650
0+010	39,856
0+020	40,714
0+030	41,519
0+040	42,086
0+050	42,342
0+060	42,575
0+070	42,746
0+080	42,923
0+090	42,788
0+100	41,880
0+110	40,970
0+120	40,581
0+130	40,322
0+140	40,091
0+150	39,236

x	Cotas
0+160	37,700
0+170	37,083
0+180	36,629
0+190	36,201
0+200	35,893
0+210	35,795
0+220	35,697
0+230	35,766
0+240	35,841
0+250	35,942
0+260	34,205
0+270	32,902
0+280	34,459
0+290	35,706
0+300	36,512
0+310	37,192
0+320	37,906

A 4 – Definição do perfil longitudinal da rotunda.

Km	R (m)	i(%)	Equação da recta	x	Cotas terreno	Cotas rasante	Pontos notáveis
0+000	∞	4,75	$y = 39,360 + ix$	0	38,650	36,390	Ramo A
0+010				10	39,856	39,835	
0+020				20	40,714	40,310	
0+030				30	41,519	40,785	
0+034,499				34,499	-	40,999	T ₁
0+040	600	4,75	$y = 40,999 + ix - \frac{x^2}{2R}$	5,501	42,086	41,235	
0+049,598				15,099	42,331	41,526	Ramo B
0+050				15,501	42,342	41,535	
0+060				25,501	42,575	42,575	
0+062,999				28,500	-	41,676	Ponto mais alto
0+063,299				28,800	-	41,676	V ₁
0+070				35,501	42,746	41,635	
0+080				45,501	42,923	41,435	
0+090				55,501	42,788	41,068	
0+092,099				57,600	-	40,970	T ₂
0+100	∞	- 4,85	$y = 40,970 + ix$	7,901	41,880	40,587	
0+110				17,901	40,970	40,102	
0+120				27,901	40,581	39,617	
0+130				37,901	40,322	39,132	
0+140				47,901	40,091	38,647	
0+150				57,901	39,236	38,162	
0+160				67,901	37,703	37,677	
0+161,706				69,607	37,594	37,594	Ramo C
0+170				77,901	37,083	37,192	
0+180				87,901	36,629	36,707	
0+190				97,901	36,201	36,222	
0+193,860				101,761	-	36,034	T ₃
0+195,823	- 674,333	- 4,85	$y = 36,034 + ix - \frac{x^2}{2R}$	1,963	35,953	35,942	Ramo D
0+200				6,14	35,893	35,765	

A 4 – Definição do perfil longitudinal da rotunda (continuação).

Km	R (m)	i(%)	Equação da recta	x	Cotas terreno	Cotas rasante	Pontos notáveis
0+210				16,14	35,795	35,445	
0+220				26,14	35,697	35,273	
0+226,228				32,368	-	35,241	V ₂
0+226,562	- 674,333	- 4,85	$y = 36,034 + ix - \frac{x^2}{2R}$	32,702	-	35,241	Ponto mais baixo
0+230				36,14	35,766	35,250	
0+240				46,14	35,841	35,375	
0+250				56,14	35,942	35,649	
0+258,596				64,736	34,946	36,002	Ramo E (T ₄)
0+260				1,404	34,205	36,069	
0+270				11,404	32,902	36,544	
0+280				21,404	34,459	37,019	
0+290	∞	4,75	$y = 36,002 + ix$	31,404	35,706	37,494	
0+300				41,404	36,512	37,969	
0+310				51,404	37,192	38,444	
0+320				61,404	37,906	38,919	
0+329,287				70,691	38,650	39,360	Ramo A

6.2.2.PERFIL LONGITUDINAL DO RAMO B

A 5 – Definição do perfil longitudinal Ramo B.

Km	R (m)	i(%)	Equação da recta	x	Cotas terreno	Cotas rasante	Pontos notáveis
0+000				0	42,331	41,526	T ₁
0+001				1		41,553	
0+002				2		41,584	
0+003				3		41,620	
0+004				4		41,659	
0+005				5		41,703	
0+006				6		41,750	
0+006,660	-242,182	2,5	$y = 41,526 + ix$	6,660		41,784	V ₁
0+007				7	-	41,802	
0+008				8	-	41,858	
0+009				9		41,918	
0+010				10	43,056	41,982	
0+011				11		42,051	
0+012				12	-	42,123	
0+013				13		42,200	
0+013,32				13,32		42,225	T ₂
0+020				6,68	43,588	42,760	
0+030				16,68	44,135	43,560	
0+040	∞	8	$y = 42,225 + ix$	26,68	44,73	44,360	
0+050				36,68	45,31	45,160	
0+053,184				39,864		45,414	T ₃
0+054				0,816		45,479	
0+055				1,816		45,556	
0+056				2,816		45,630	
0+057	400	8	$y = 45,414 + ix - \frac{x^2}{2R}$	3,816		45,701	
0+057,482				4,298		45,735	V ₂
0+058				4,816		45,771	
0+059				5,816		45,837	

A 5 – Definição do perfil longitudinal do Ramo B (continuação).

Km	R (m)	i(%)	Equação da recta	x	Cotas terreno	Cotas rasante	Pontos notáveis
0+060				6,816	45,906	45,902	
0+061	400	8	$y = 45,414 + ix - \frac{x^2}{2R}$	7,816		45,963	
0+061,764				8,58		46,009	T ₄
0+070	∞	5,855	$y = 46,009 + ix$	8,236	46,491	46,491	

6.2.3.PERFIL LONGITUDINAL DO RAMO C

A 6 - Perfil longitudinal do Ramo C.

Km	R (m)	i(%)	Equação da recta	x	Cotas terreno	Cotas rasante	Pontos notáveis
0+000				0	37,594	37,594	T ₁
0+001				1		37,618	
0+002				2		37,642	
0+003				3		37,664	
0+004				4		37,685	
0+005				5		37,705	
0+006				6		37,724	
0+006,613	881,733	2,5	$y = 37,594 + ix - \frac{x^2}{2R}$	6,613		37,735	V ₁
0+007				7	-	37,741	
0+008				8	-	37,758	
0+009				9		37,773	
0+010				10	37,727	37,787	
0+011				11		37,800	
0+012				12	-	37,812	
0+013				13		37,823	
0+013,226				13,32		37,825	T ₂
0+020	∞	1	$y = 37,825 + ix$	6,774	37,860	37,893	
0+029,893				16,667		37,992	
0+030	∞	1,332	$y = 37,992 + ix$	0,107	37,993	37,994	
0+030,484				0,484	38,000	38,000	

6.2.4.PERFIL LONGITUDINAL DO RAMO D

A 7 - Perfil longitudinal do Ramo D.

Km	R (m)	i(%)	Equação da recta	x	Cotas terreno	Cotas rasante	Pontos notáveis
0+000				0	35,953	35,942	
0+006,381				6,381		35,782	T ₁
0+007				0,619		35,765	
0+008	100	-2,5	$y = 35,942 + ix - \frac{x^2}{2R}$	1,619		35,729	
0+008,01				1,629		35,728	V ₁
0+009				2,619		35,683	
0+009,639				3,258		35,648	T ₂
0+010				0,361	34,497	35,627	
0+020				10,361	35,041	35,051	
0+030	∞	-5,76	$y = 35,648 + ix$	20,361	34,475	34,475	
0+038,25				28,611	34,000	34,000	

6.2.5.PERFIL LONGITUDINAL DO RAMO E

A 8 - Perfil Longitudinal do Ramo E.

Km	R (m)	i(%)	Equação da recta	x	Cotas terreno	Cotas rasante	Pontos notáveis
0+000				0	34,946	36,002	T ₁
0+001				1		35,978	
0+002				2		35,955	
0+003				3		35,934	
0+003,339	-667,8	-2,5	$y = 36,002 + ix - \frac{x^2}{2R}$	3,339		35,922	V ₁
0+004				4		35,914	
0+005				5		35,896	
0+006				6		35,879	
0+006,678				6,678		35,868	T ₂
0+010	∞	-1,5	$y = 35,868 + ix$	3,322	35,293	35,819	

A 8 – Definição do perfil longitudinal do Ramo E (continuação).

Km	R (m)	i(%)	Equação da recta	x	Cotas terreno	Cotas rasante	Pontos notáveis
0+020	∞	-1,5	$y = 35,868 + ix$	13,322	35,64	35,669	
0+021,472				14,794		35,647	
0+030	∞	-1,646	$y = 35,647 + ix$	8,528	35,506	35,506	
0+040				18,528	35,342	35,342	
0+050				28,528	35,711	35,177	
0+060				38,528	35,012	35,012	
0+060,747				39,275	35,000	35,000	

6.3.PEÇAS DESENHADAS

Desenho n.º 1 – Planta de implantação, escala 1/1000

Desenho n.º 2 – Planta de implantação, escala 1/1000

Desenho n.º 3 – Perfil longitudinal rotunda, escala 1/1000

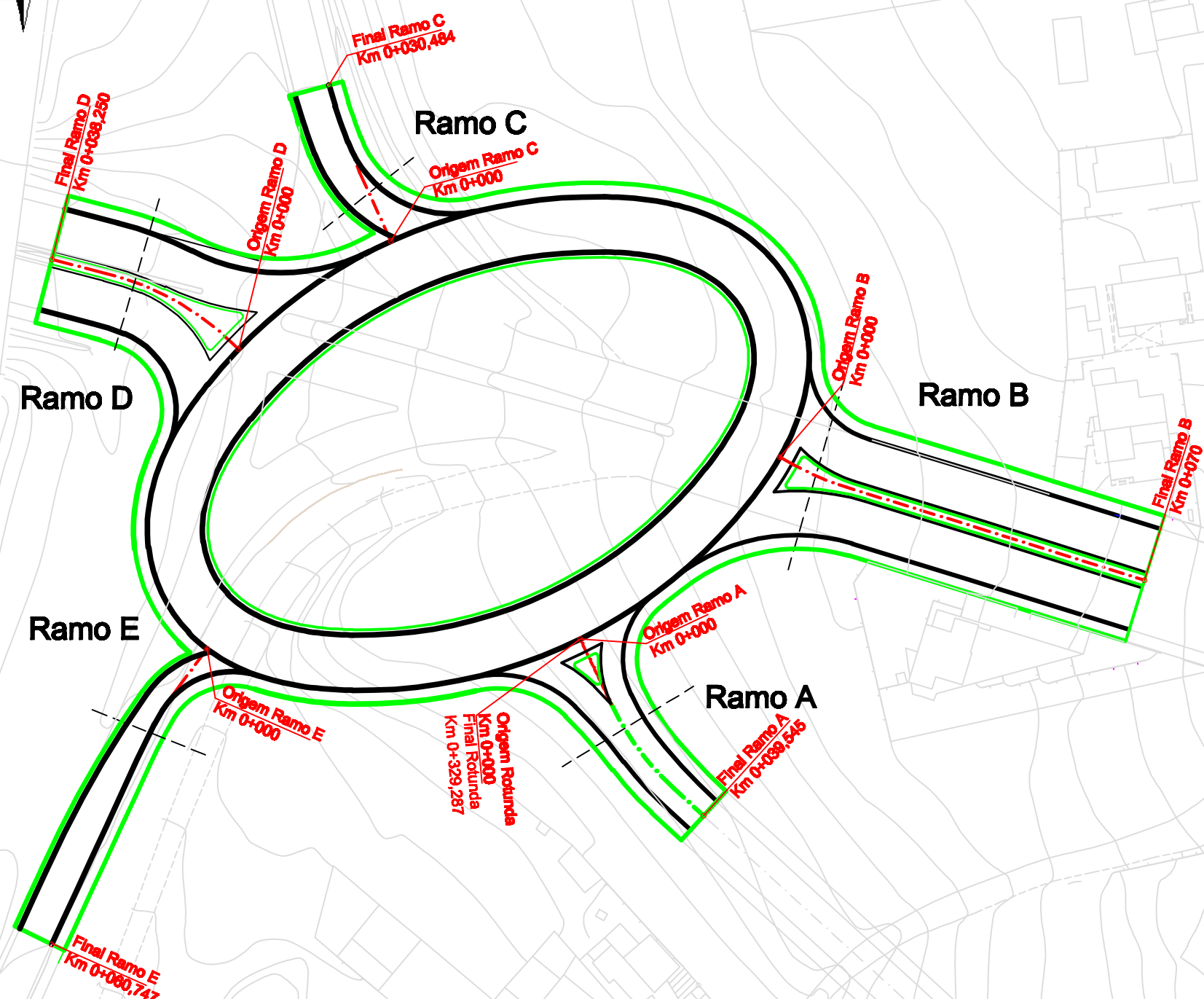
Desenho n.º 4 – Perfil longitudinal Ramo A, escala 1/1000

Desenho n.º 5 – Perfil longitudinal Ramo B, escala 1/1000

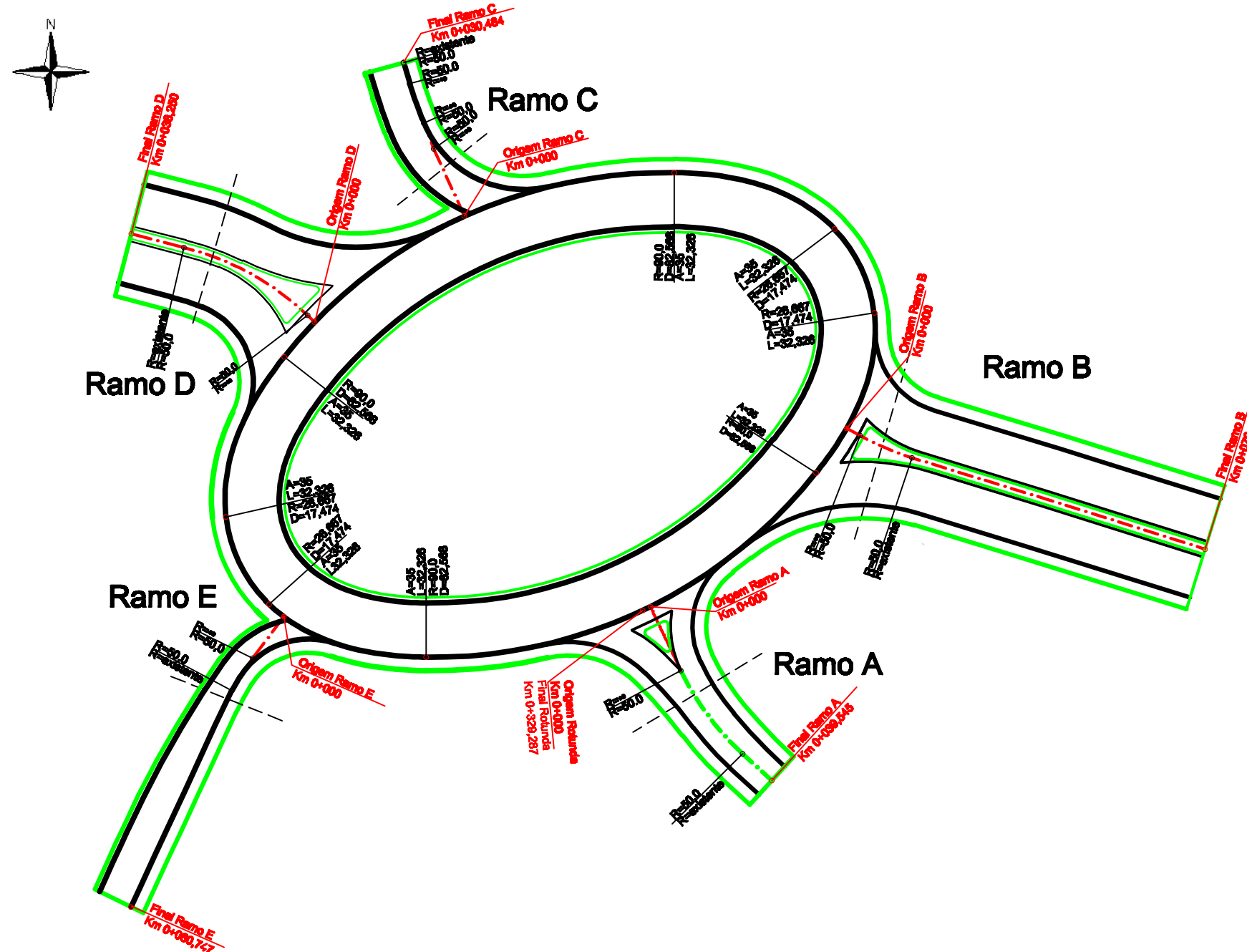
Desenho n.º 6 – Perfil longitudinal Ramo C, escala 1/1000

Desenho n.º 7 – Perfil longitudinal Ramo D, escala 1/1000

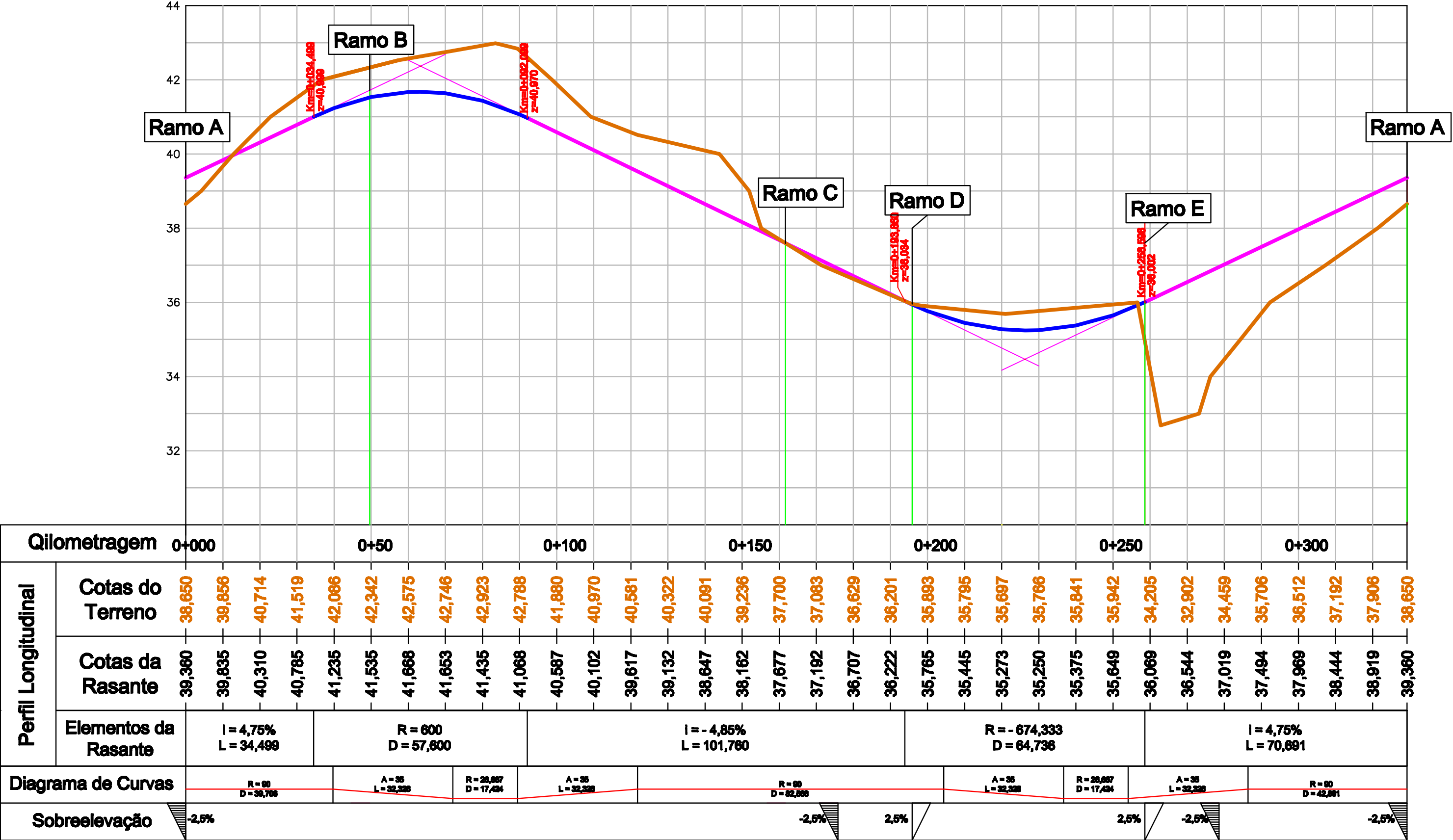
Desenho n.º 8 – Perfil longitudinal Ramo E, escala 1/1000



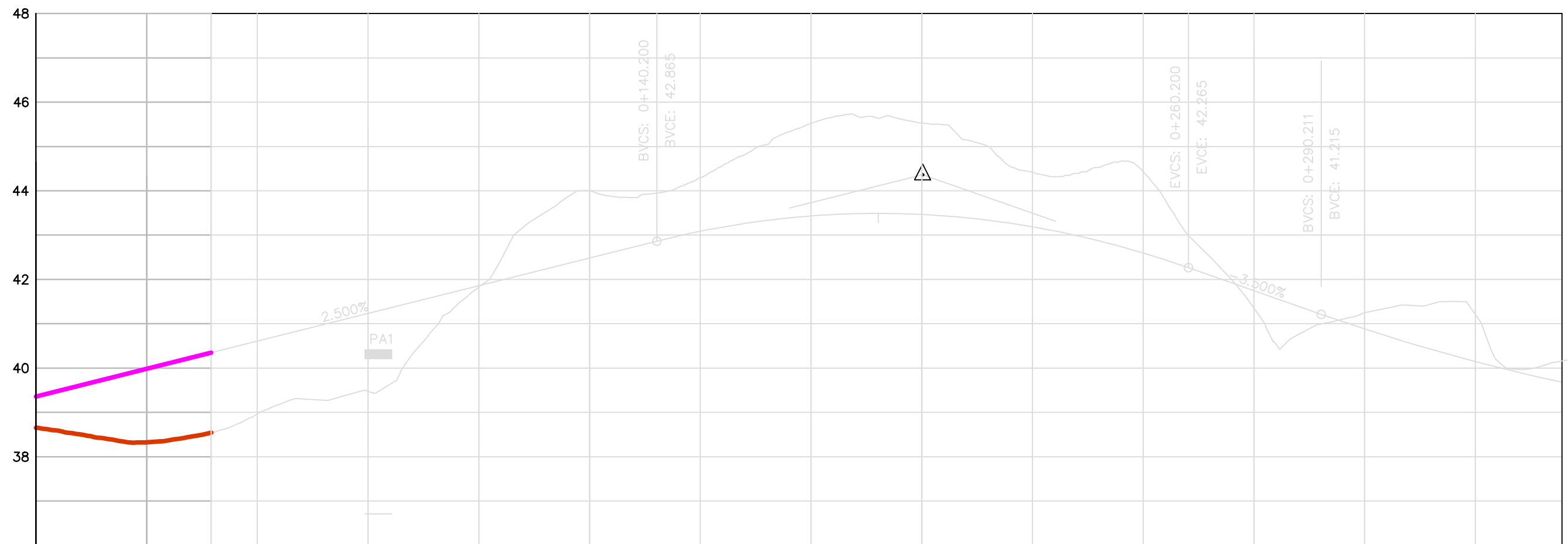
DESENHO N.º 1
Panta de Implantação
ESCALA 1:1000



DESENHO N.º 2
Planta de Implantação
ESCALA 1:1000

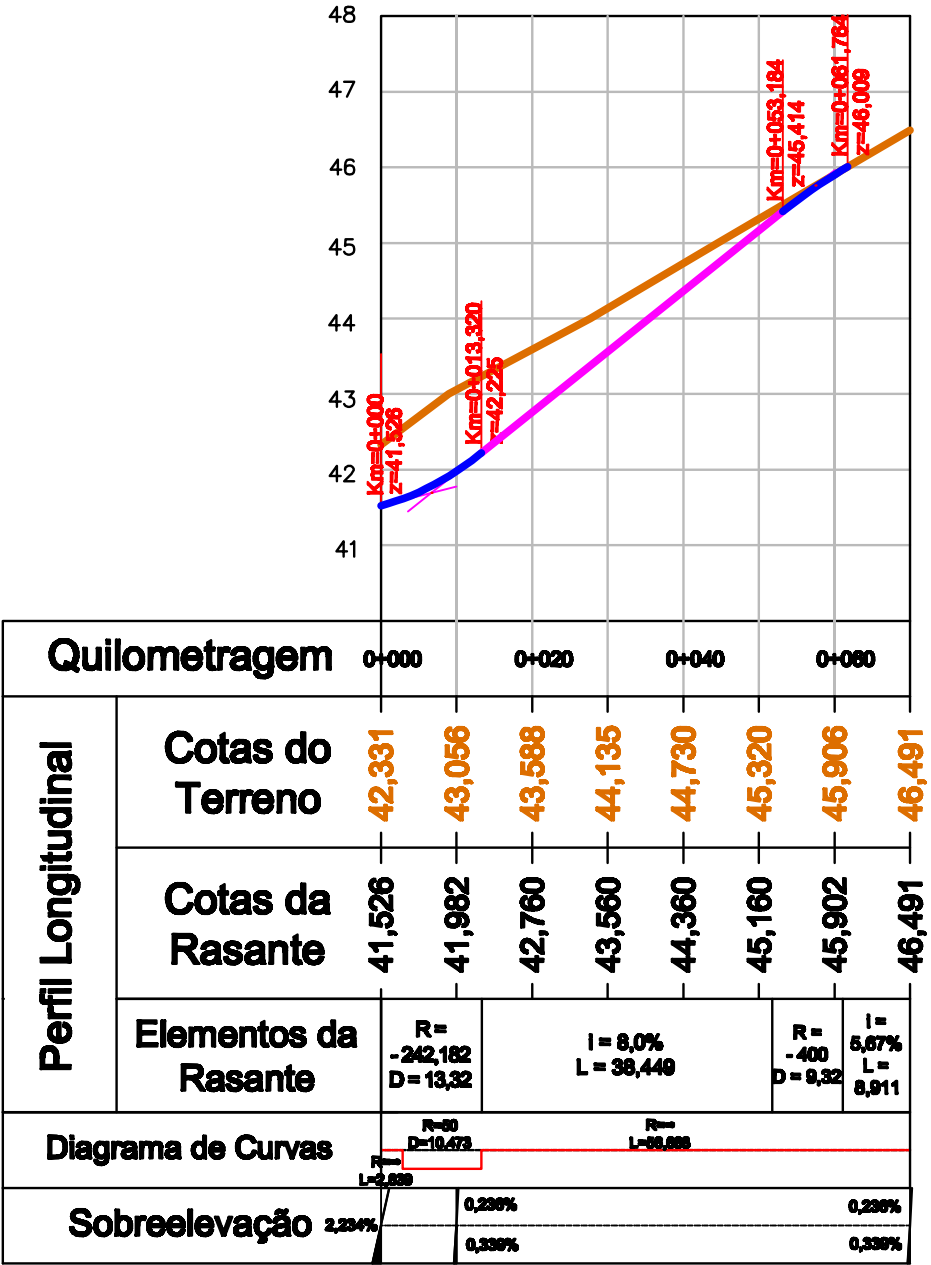


DESENHO N.º 3
PERFIL LONGITUDINAL
ROTUNDA
ESCALA 1:1000 / 1:100

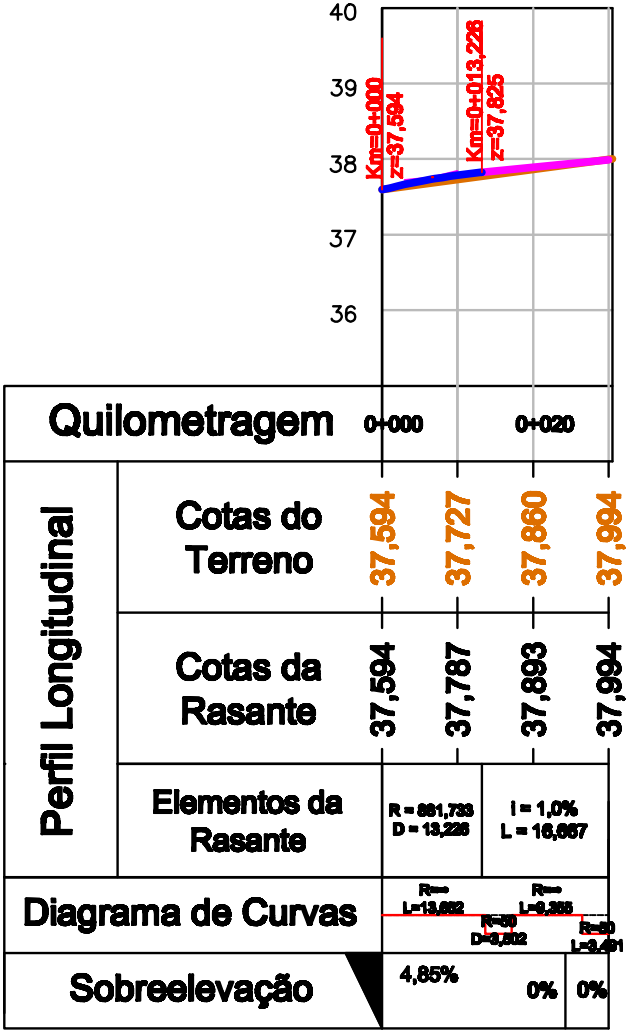


Quilometragem		0+000	0+025	0+050	0+075	0+100	0+125	0+150	0+175	0+200	0+225	0+250	0+275	0+300	0+325
Perfil Longitudinal	Cotas do Terreno	38,650	38,330	38,330	39,470	41,820	44,000	44,290	45,520	45,530	44,420	44,440	41,350	41,250	41,210
	Cotas da Rasante	39,360	39,985	39,985	41,235	41,860	42,485	43,086	43,432	43,466	43,187	42,596	41,747	40,884	40,148
	Elementos da Rasante			i = 2,5% L = 140,2m				R = 2000m D = 120,00m				i = -3,5% L = 84,386m			
	Sobreelevação	4,75%	2,5%	-2,5% 2,5%											

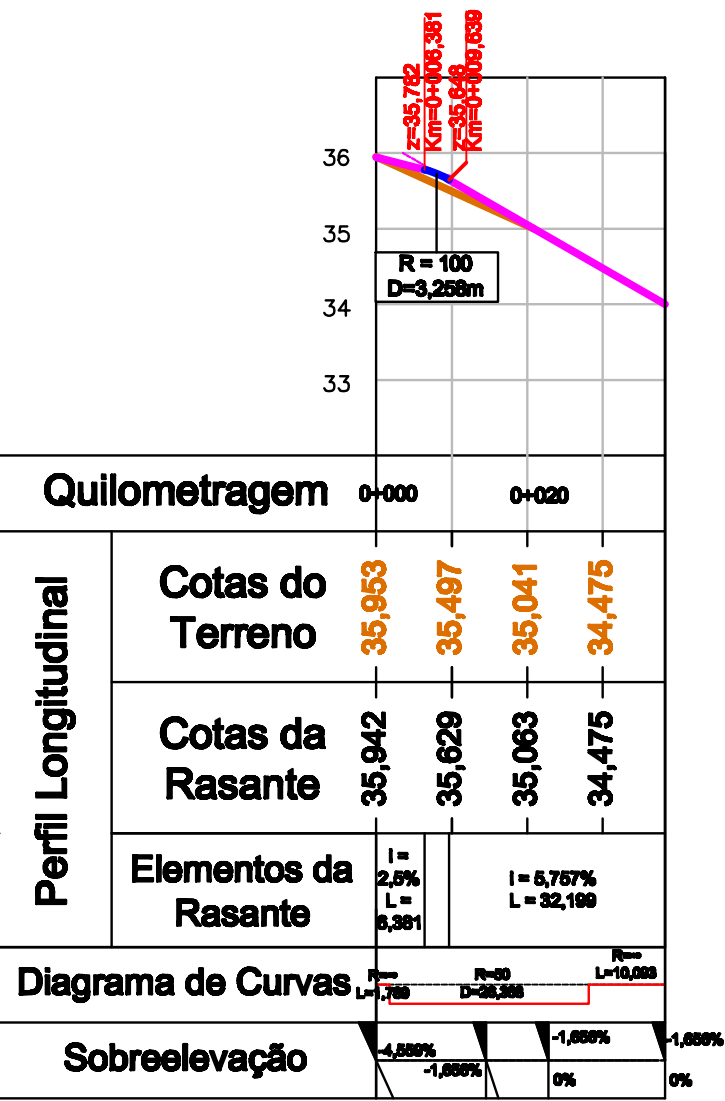
DESENHO N.º 4
PERFIL LONGITUDINAL
Ramo A
ESCALA 1:1000 / 1:100



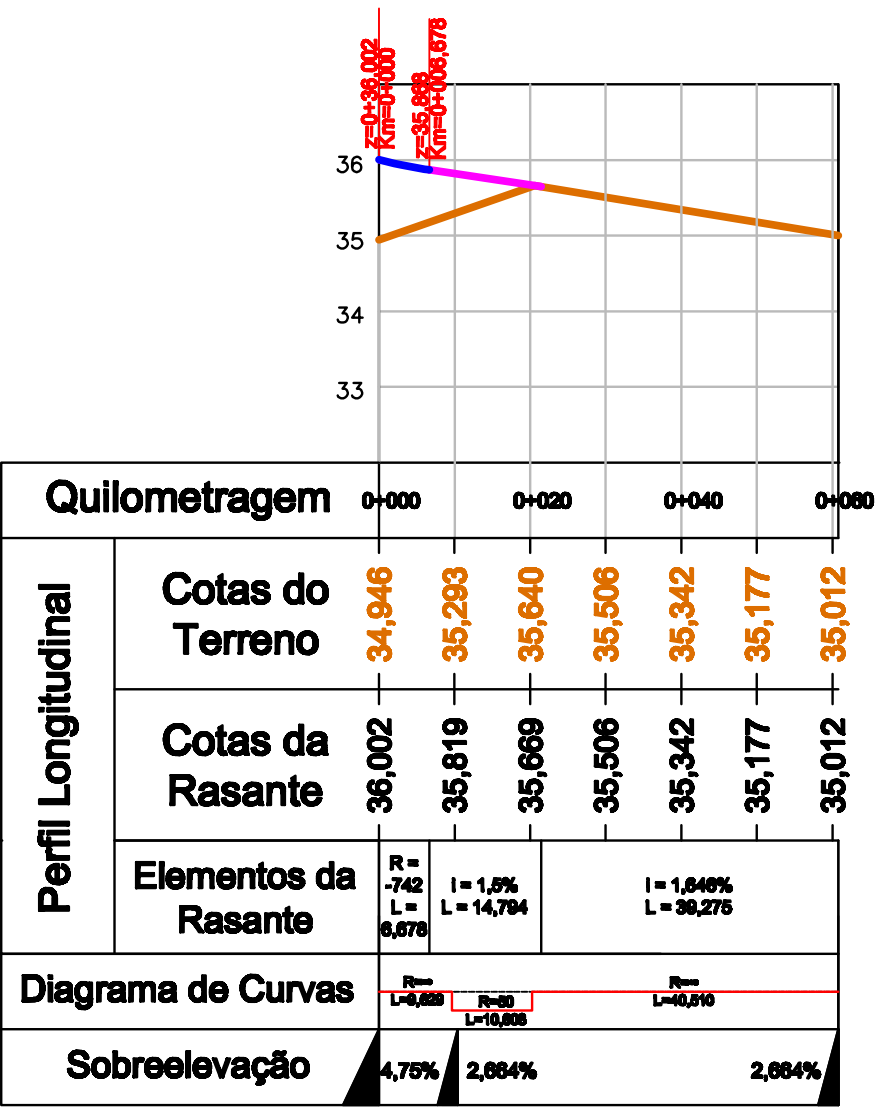
DESENHO N.º 5
PERFIL LONGITUDINAL
Ramo B
ESCALA 1:1000 / 1:100



DESENHO N.º 6
PERFIL LONGITUDINAL
Ramo C
ESCALA 1:1000 / 1:100



DESENHO N.º 7
PERFIL LONGITUDINAL
Ramo D
ESCALA 1:1000 / 1:100



DESENHO N.º 8
PERFIL LONGITUDINAL
Ramo E
ESCALA 1:1000 / 1:100